

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：34506

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02869

研究課題名（和文）極初期宇宙における星形成の研究

研究課題名（英文）Star Formation in the very Early Universe

研究代表者

須佐 元 (Susa, Hajime)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：00323262

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：極初期宇宙での星形成過程の解明は現代宇宙論において最も重要なテーマの一つである。この研究では最初期の宇宙でのガス雲の収縮からどのように星が生まれるかを調べた。特にこれまで論争があった「ガス雲から複数の星が生まれるのか、あるいは単星が生まれるのか」について、これまでの多くの研究を包含する形で「複数の星が生まれる」ことを理論的に明らかにした。またこのようなガス雲がこれまでの数値シミュレーションで乱流的になることがわかっていたが、その物理的原因を明確な理論で説明することにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究成果は学術的には、ほぼ10年にわたって論争になっていた初代星の生まれ方についての明確な回答を与えている点で重要である。研究グループ間の結果の相違が、同じ量の異なる時刻に対応する量を見ていたからであることを明らかにした。このような論争は研究コミュニティにとって研究を進める力となる一方、互いの研究結果を今ひとつ信じることができないということにもつながり、解決が待たれていた。その意味で非常に重要な結果である。同じことは初代星母天体の乱流の起源を明らかにした研究にも言える。数値的に表れた結果が本当に物理的なのかを突き詰めて考察することは研究を推進する上で不可欠である。

研究成果の概要（英文）：The elucidation of the star formation process in the very early universe is one of the most important topics in modern cosmology. In this study, we investigated how stars are formed from the contraction of gas clouds in the early universe. In particular, we theoretically clarified the controversial question of whether multiple stars or a single star is born from a gas cloud, in a manner that encompasses many previous studies. We also succeeded in providing a clear theoretical explanation for the physical causes of the turbulent nature of such gas clouds, which had been known from previous numerical simulations.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：初代星 宇宙論 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

極初期宇宙の天体形成の研究は1960年代から連綿と行われてきたが、1990年代半ばから背景となる宇宙論モデルの整備と数値計算パワーの増大に促されて大きく進展してきた。その理論的研究の結果、赤方偏移が約10-30の時代に最初の星々「初代星」が生まれることがわかってきた。これらの星は約百万太陽質量の「ミニハロー」と呼ばれる銀河に比べればずっと小さい母天体の中で生まれる。これらのミニハロー中の原始的組成のガスはヘリウムよりも重い元素をほとんど含まないために、冷却の効率が悪く、比較的高温のまま収縮する。その結果、高い圧力に打ち勝つために収縮するガス雲の質量は大きくなければならず、必然的に初代星の質量は非常に重く、100太陽質量を超えるものばかりが生まれると当初考えられた (e.g. Abel, Bryan, Norman 2002; Yoshida et al. 2006)。

第0近似としてはこの理解は間違っていないが、その後2010年代の研究で、初代星形成の質量降着期には、原始星は周りに円盤を伴い、多くの場合円盤が自己重力で分裂することが数値計算によって明らかにされた (e.g. Clark et al. 2011; Greif et al. 2012; Susa 2013; Machida&Doi 2014)。これらの分裂片がそれぞれ星として成長するとすれば、初代星の質量は当初考えられてきた程重いものばかりではなく、100太陽質量を大きく下回るものも多く生まれる可能性が指摘され (Stacy et al. 2012, Susa et al. 2014)、現在まで生き残るほど小質量のものもいる可能性が議論されていた (Hartwig et al. 2015, Komiya et al. 2015, Ishiyama et al. 2016)。しかしながら多くのグループの数値計算の結果がそれほど整合的には見えず、数値計算法による違いなどが議論されており、かなり錯綜した状況であった。

また伝統的に初期宇宙の星形成では磁場は弱いと考えられ無視されてきたが、当時主として国外の研究グループによって磁場の重要性が主張されていた。近傍の星形成領域では磁場が重要な役割を果たすことが知られており、磁場が強ければ初代星形成でも無視できないのは明らかである。近年の研究では乱流ダイナモと呼ばれるメカニズムにより、初代星が生まれる環境ですでにかなり強い磁場が存在する可能性が示唆されていた。その結果として初代星の形成、特に円盤の分裂による複数の星の形成を抑制するのではないかと考えられていたが、その磁場を生成する原因となる乱流場については、宇宙論的数値シミュレーションを行うと現れることが知られていたものの、その物理的原因については明らかでなかった。また磁場の増幅については逆に数値計算に十分な解像度がなく、解析的議論で予測されているという状況であった。

もう一つ、初代星形成理論の重要な発展の方向として当時から期待されていたのは、わずかな重元素を含む場合の星形成理論である。これは初代銀河中での星形成の主たる成分であり、それらが宇宙再電離期の星形成密度で圧倒的に卓越することから重要である。これらの問題では磁気流体を取り扱うことになるが、磁場とガスの結合はそれぞれの星が生まれる環境で、電気抵抗率を知らなければ正しく取り扱うことができない。研究代表者と分担者は初代星および初代銀河中での低金属量環境で、正しい電気抵抗率を計算しそれを非理想磁気流体計算に取り入れるということを目指して研究を進めていたが (Maki, Susa 2014, 2017; Machida, Doi 2014; Susa et al. 2015)、特に高密度 (数密度 $> 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) での計算の取り扱いについて問題があった。また低金属量環境での非理想磁気流体計算での星形成計算はまだ行われていなかった。

2. 研究の目的

このような当時の研究状況を背景として、本研究ではまず1)降着円盤の分裂による小質量初代星の形成について数値シミュレーションを用いて詳細に調べることが主たる目的とした。低質量初代星は現在の宇宙での痕跡を探る際の手がかりとなるものでもあり、重要であるが、数値計算分解能の問題 ($> 30 \text{ AU}$) により、これまでは小質量側でおそらく星の数を過小評価していることが予測されており、この問題を解決するために、1 AUを分解する計算を行うことによって円盤の自己重力による分裂を正しく追い、可能な限り長時間降着過程を計算することを目指した。どのくらい長時間計算が必要かという点、最初の初代星が生まれてから1万年ほど経過すると、原始星からの輻射のフィードバックによってガスの降着が止まることが輻射流体計算によって予測されており (Hosokawa et al 2011, Susa et al 2014)、この知見からおよそ最初の原始星形成から1万年後の質量を見積り、最初の分裂片から進化した、最終的な初代星の質量を明らかにすることを目的とした。また、2)乱流によって増幅された磁場中での初代星形成を調べることも目的とした。乱流による磁場の増幅は解析的なモデルを作って取り扱うことを目指した。この点については期間内では完成しなかったが、後述するようにそもそもの乱流の成因の物理理解について大きな成果が挙げられた。さらに3)非理想磁気流体計算を初代銀河環境、すなわち低金属量環境での星形成の問題に適用し、初期宇宙での星形成についての調べる、ということも目的とした。

3. 研究の方法

まず1)についてはSPH法を用いて計算を行った。質量降着期に可能な限り長時間計算を行う必要があるため、熱進化はone-zone計算の結果を用いてパロトロピックな状態方程式を仮定することにより簡略化した。また初期条件についても、物理を明らかにするために、宇宙論的な計算から取り出すのではなく、宇宙論的な計算に近い、理想化された初期条件を用いて計算を行った。計算が非常に長期にわたる(数ヶ月)のために、新たに計算サーバーを購入し、専属機として計算を流し続けた。またこの種の数値計算においてしばしば問題になる手法(シンク粒子法・非シンク粒子法)による違いについても比較を行った。2)については乱流磁場を考慮した磁気流体計算に進む前に、そもそも自己重力で収縮するガス雲の中で乱流がどのように発達するのかを調べた。解適合格子を用いた数値シミュレーションと解析的手法を組み合わせることにより、物理的理解を得ることを目指した。3)についてはこれまでの研究で得られた磁場と流体の結合モデル(抵抗率・プラズマドリフトの係数)をNested Gridの磁気流体計算シミュレーションコードに実装し、低金属量環境での星形成の特徴を探った。またよりよい化学種の計算モデルの構築を目指した。

4. 研究成果

最大の成果は1)に関するものである。上記のように長期間の数値計算を行い、分裂片の質量や数の進化を調べた。まずこれまでの研究でも知られていたことであるが、質量降着期には降着円盤が形作られ、自己重力不安定となり分裂することを確かめた(図1)。またその分裂片のかんりの割合(〜70%)はかなり短い時間(100年程度)で合体することも確かめた。この結果はこれまでの過去の計算(例えば Greif et al. 2012)と整合的である。合体を免れて生き残る星は3割程度であるが、少なくともこの計算で1万年程度までは最初の星ができてからの時間を t として $t^{0.3}$ に比例してゆっくりと増加し続けることを発見した。またこれらの結果は初期乱数や、数値計算法(シンク粒子を使うか使わないか)にはよらないことも明らかにした。

最も重要な発見は以下のように数値計算結果の解釈にあった。この系はコア収縮期には自己相似的な物理量の分布をもつ。したがって質量降着期の初期条件は常に自己相似的であり、あまり収縮が開始する時(コア収縮期)の初期条件にはよらない。一方自己重力流体の系はスケール変換の自由度が一つある。これまでの多くの数値計算はそれぞれ異なった密度上限を設定して計算を行っていたため、一見全く異なる結果を得ているようにみえていた。しかし上記スケール変換の自由度を用いて時間(横軸)をスケールし直すと、図2のようにほとんど全ての文献の結果がおよそ同じトレンドに乗ることを発見した。この事実は、計算手法に結果がよらないことと相まって、これまでのさまざまなグループにおける数値計算の結果が概ね整合的で「正しい」計算を行っていることを示している。翻ってこの計算やこれまでの計算が予測するように、分裂片が少なくともこのスケールされた時間で200年程度までは増え続けることを示しており、輻射フィードバックによって質量降着が抑制され

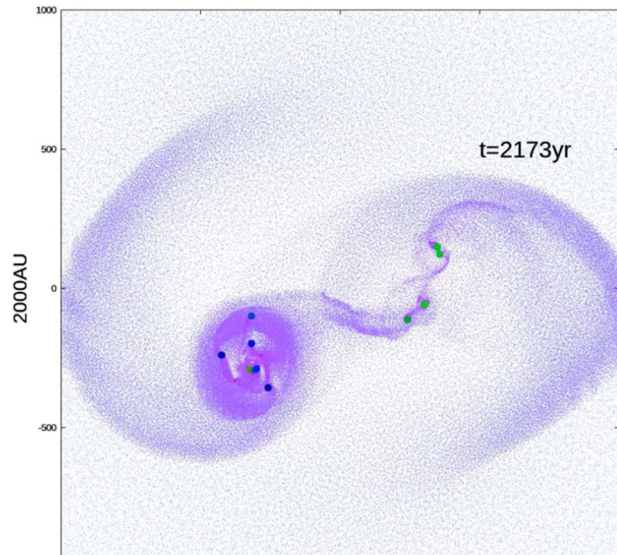


図1 初代星形成シミュレーションのスナップショット。細かいドットはSPH粒子を表し、点はシンク粒子の位置を表す。差し渡しは2000AUである。

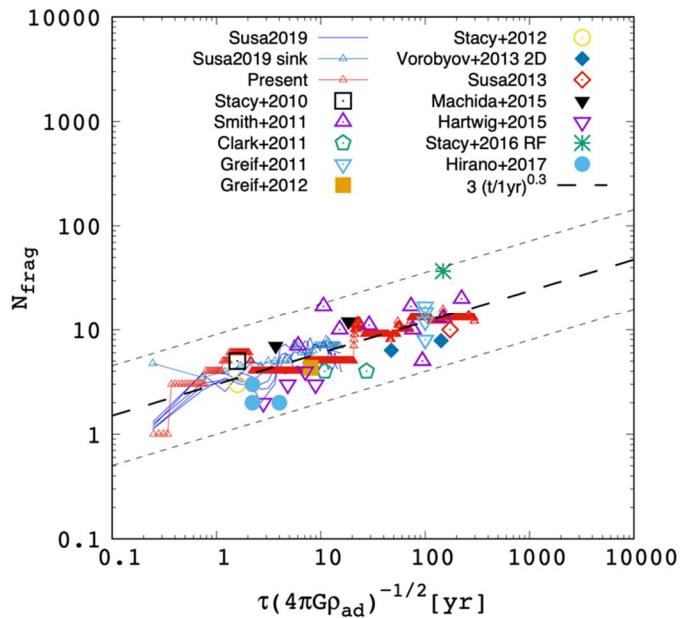


図2 スケールされた時間 v.s. 分裂片の数。赤三角と細かい実線が本研究の結果。その他は文献値。

うと考えられる 1 万年程度まで外挿すれば数十個の分裂片が誕生することを示している。この研究の内容は Susa(2019) (一部 Arimoto et al. 2021) に発表されているが、後続研究にインパクトを与え、2022 年 6 月現在で 47 回引用されている (Astrophysics data system 調べ)。今後もこの議論は一つの軸として用いられることが予想され、この研究以前の世界的に混乱していた研究の状況を物理的議論により整理し、その後の研究の流れを作ったという意味でも大きな成果であった。

2) についてはまず乱流の成因を探るところから開始したため、乱流磁場を含む流体計算を実装するところまでは残念ながら期間内に到達しなかった。しかしながら乱流の成因について以下のように深い理解が得られた。まずこの研究では解適合格子を用いた数値シミュレーションコード (Enzo) を用いて、さまざまな場合 (ポリトロープ、およびバロトロピックな圧力-密度関係) について、ミニハロー中でのガス雲の自己重力収縮をシミュレートした。その際、さまざまな強度の初期乱流を加え、その成長を追った。一方で収縮するコアはほぼ一様であるために、「逆宇宙膨張」のように考えることができることを使い、速度の揺らぎが膨張宇宙では減衰するところが、収縮するガス雲では逆に成長するという物理的理解が可能である。これを定式化し、数値シミュレーションとの比較を行ったところ、あらゆるケースについていずれもよく合致することがわかった (Higashi et al. 2021)。これにより宇宙論の数値計算で現れる自己重力収縮する雲の強い乱流場は物理的必然であることが確認でき、ひいてはそれをエネルギー源として起きる磁場の増幅も不可避であることが明らかとなった。元々数値的に確認されていた乱流場とはいえ、数値的な人工物ではなく物理的に現れることをその値も含めて確証を与えたことは非常に大きな成果と言える。今後は既に取り掛かっている小スケールダイナモのサブグリッドモデル化を行い、最もリアルな初代星形成の磁気流体モデルの構築を目指す。

3) についてはまず磁場の影響などを考慮せずに、宇宙論的計算によって初代星による重元素汚染の様子を調べた (Chiaki et al. 2018)。その結果第二世代の星はコア崩壊型の初代星の残骸から金属量で $[Fe/H] = -5$ から -3 程度で生まれると考えるのが妥当であることを定量的に導いた。この結果は観測される金属欠乏星の性質とよく合致している。

また、これまでの研究 (Susa et al. 2015) で得られた磁場とガスの結合係数 (抵抗率・両極性拡散率) を用い、レギュラーな初期磁場で、非理想磁気流体計算による低金属量での星形成計算を行なった (Higuchi et al. 2018, 2019)。その結果、概ね、磁場によるアウトフローは金属量が太陽の 1 万分の 1 程度以上であれば発現し、正味の質量降着率を規制することがわかった。ガスの熱進化の議論からは、金属量が太陽の 1 万分の 1 から 1 千分の 1 程度以上であれば初期宇宙の大質量形成のモードから太陽程度の星の形成モードに移行するということが言われている。したがって磁場の効果の観点からも同程度の金属量で星形成のモードが変わると思われることがわかった。

また、これまでの研究で調べてきた磁場とガスの結合の様子をアップデートし、精密化を行なった (Nakauchi et al. 2019, 2021)。これによって原始組成の場合・低金属量の場合ともに、高密度領域での抵抗率の飛びがなくなり、高密度領域まで物理的に正しく磁場とガスの結合を追跡できることになった。

この新しい結合の係数を非理想 MHD 計算に適用した。まずは原始組成でかつ、初期条件でレギュラーな構造を持つ磁場の場合を調べたところ、磁場からの非理想性に起因する熱進化への影響は無視できること、天の川銀河内の分子雲よりも二桁弱い初期磁場でも強い磁気制動効果が得られることが明らかになった (Sadanari et al. 2021)。低金属量環境でのアップデートされた抵抗率を用いた同様の計算、および乱流的な磁場での同様の計算は今現在進行中である。

その他) 本研究費では関連する研究者による研究会 (初代星・初代銀河研究会) をほぼ毎年サポートしている。以下にこの科研費の期間内で行われた当該研究会のリストを挙げる。この研究会の開催により、関連する多くの研究が行われた。

- 2022 年 2 月 「[初代星・初代銀河研究会 2021](#)」 参加者 140 名 (京都大学 東京オフィス/東北 大学 東京分室 + オンライン)
- 2020 年 11 月 「[初代星・初代銀河研究会 2020](#)」 参加者 100? 名 (東北大学+オンライン)
- 2019 年 11 月 「[初代星・初代銀河研究会](#)」 参加者 60 名 (名古屋大学)
- 2018 年 11 月 「[初代星・初代銀河研究会](#)」 参加者 50 名 (茨城大学)
- 2018 年 2 月 「[初代星・初代銀河研究会](#)」 参加者 50 名 (呉高専)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計32件（うち査読付論文 26件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Higashi Sho, Susa Hajime, Chiaki Gen	4. 巻 915
2. 論文標題 Amplification of Turbulence in Contracting Prestellar Cores in Primordial Minihalos	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 107 ~ 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac01c7	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 Chon Sunmyon, Omukai Kazuyuki, Schneider Raffaella	4. 巻 508
2. 論文標題 Transition of the initial mass function in the metal-poor environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4175 ~ 4192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2497	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 Abe Makito, Yajima Hidenobu, Khochfar Sadegh, Dalla Vecchia Claudio, Omukai Kazuyuki	4. 巻 508
2. 論文標題 Formation of the first galaxies in the aftermath of the first supernovae	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3226 ~ 3238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2637	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 Sadanari Kenji Eric, Omukai Kazuyuki, Sugimura Kazuyuki, Matsumoto Tomoaki, Tomida Kengo	4. 巻 505
2. 論文標題 Magnetohydrodynamic effect on first star formation: pre-stellar core collapse and protostar formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4197 ~ 4214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1330	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 Sassano Federica, Schneider Raffaella, Valiante Rosa, Inayoshi Kohei, Chon Sunmyon, Omukai Kazuyuki, Mayer Lucio, Capelo Pedro R	4. 巻 506
2. 論文標題 Light, medium-weight, or heavy? The nature of the first supermassive black hole seeds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 613 ~ 632
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1737	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 Tagawa Hiromichi, Haiman Zoltan, Bartos Imre, Kocsis Bence, Omukai Kazuyuki	4. 巻 507
2. 論文標題 Signatures of hierarchical mergers in black hole spin and mass distribution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3362 ~ 3380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2315	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 Nakauchi Daisuke, Omukai Kazuyuki, Susa Hajime	4. 巻 502
2. 論文標題 Ionization degree and magnetic diffusivity in star-forming clouds with different metallicities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3394 ~ 3416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab248	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 Tanikawa Ataru, Yoshida Takashi, Kinugawa Tomoya, Trani Alessandro A., Hosokawa Takashi, Susa Hajime, Omukai Kazuyuki	4. 巻 926
2. 論文標題 Merger Rate Density of Binary Black Holes through Isolated Population I, II, III and Extremely Metal-poor Binary Star Evolution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 83 ~ 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4247	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 Tanikawa Ataru, Susa Hajime, Yoshida Takashi, Trani Alessandro A., Kinugawa Tomoya	4. 巻 910
2. 論文標題 Merger Rate Density of Population III Binary Black Holes Below, Above, and in the Pair-instability Mass Gap	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 30 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe40d	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 Kawasaki Yoshihiro, Koga Shunta, Machida Masahiro N	4. 巻 504
2. 論文標題 Growth of magnetorotational instability in circumstellar discs around class 0 protostars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5588 ~ 5611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1224	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 Hirano Shingo, Machida Masahiro N., Basu Shantanu	4. 巻 917
2. 論文標題 Supermassive Star Formation in Magnetized Atomic-cooling Gas Clouds: Enhanced Accretion, Intermittent Fragmentation, and Continuous Mergers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 34 ~ 34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0913	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 Harada Naoto, Hirano Shingo, Machida Masahiro N, Hosokawa Takashi	4. 巻 508
2. 論文標題 Impact of magnetic braking on high-mass close binary formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3730 ~ 3747
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab2780	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 Machida Masahiro N, Hirano Shingo, Kitta Hideyuki	4. 巻 491
2. 論文標題 Misalignment of Magnetic Fields, Outflows and Discs in Star-forming Clouds	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 2180-2197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz3159	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 Machida Masahiro N., Basu Shantanu	4. 巻 876
2. 論文標題 The First Two Thousand Years of Star Formation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 149 ~ 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab18a7	査読の有無 無
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 Higuchi Koki, Machida Masahiro N, Susa Hajime	4. 巻 486
2. 論文標題 Driving conditions of protostellar outflows in different star-forming environments	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 3741 ~ 3754
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1079	査読の有無 無
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 Susa Hajime	4. 巻 877
2. 論文標題 Merge or Survive: Number of Population III Stars per Minihalo	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 99 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1b6f	査読の有無 無
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 Matsukoba Ryoki、Takahashi Sanemichi Z、Sugimura Kazuyuki、Omukai Kazuyuki	4. 巻 484
2. 論文標題 Gravitational stability and fragmentation condition for discs around accreting supermassive stars	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 2605 ~ 2619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3522	査読の有無 無
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 Nakauchi Daisuke、Omukai Kazuyuki、Susa Hajime	4. 巻 488
2. 論文標題 Ionization degree and magnetic diffusivity in the primordial star-forming clouds	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 1846 ~ 1862
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz1799	査読の有無 無
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 ~ L14
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 無
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 Matsushita Yuko、Takahashi Satoko、Machida Masahiro N.、Tomisaka Kohji	4. 巻 871
2. 論文標題 A Very Compact Extremely High Velocity Flow toward MMS 5/OMC-3 Revealed with ALMA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 221 ~ 221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf1b6	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 Koga Shunta, Tsukamoto Yusuke, Okuzumi Satoshi, Machida Masahiro N	4. 巻 484
2. 論文標題 Dependence of Hall coefficient on grain size and cosmic ray rate and implication for circumstellar disc formation	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 2119 ~ 2136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3524	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 Hirano Shingo, Machida Masahiro N	4. 巻 485
2. 論文標題 Origin of misalignments: protostellar jet, outflow, circumstellar disc, and magnetic field	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 4667 ~ 4674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz740	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 Fukushima Hajime, Yajima Hidenobu, Omukai Kazuyuki	4. 巻 477
2. 論文標題 Condition for dust evacuation from the first galaxies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1071 ~ 1085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty799	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, Hosokawa Takashi, Yajima Hidenobu, Inayoshi Kohei, Omukai Kazuyuki	4. 巻 478
2. 論文標題 Stunted accretion growth of black holes by combined effect of the flow angular momentum and radiation feedback	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3961 ~ 3975
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1298	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 Nakauchi Daisuke, Omukai Kazuyuki, Schneider Raffaella	4. 巻 480
2. 論文標題 Condition for low-mass star formation in shock-compressed metal-poor clouds	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1043 ~ 1056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty1911	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 Chiaki Gen, Susa Hajime, Hirano Shingo	4. 巻 475
2. 論文標題 Metal-poor star formation triggered by the feedback effects from Pop III stars	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4378 ~ 4395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty040	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 Higuchi Koki, Machida Masahiro N, Susa Hajime	4. 巻 475
2. 論文標題 Evolution of magnetic fields in collapsing star-forming clouds under different environments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3331 ~ 3347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty046	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 Shuta J., Chiaki Gen, Tominaga Nozomu, Susa Hajime	4. 巻 844
2. 論文標題 Blocking Metal Accretion onto Population III Stars by Stellar Wind	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 137 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa7e2c	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 Matsushita Yuko、 Sakurai Yuya、 Hosokawa Takashi、 Machida Masahiro N	4. 巻 475
2. 論文標題 Massive outflows driven by magnetic effects ? II. Comparison with observations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 391 ~ 403
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx3070	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 Machida Masahiro N.、 Higuchi Koki、 Okuzumi Satoshi	4. 巻 473
2. 論文標題 Different modes of star formation: gravitational collapse of magnetically subcritical cloud	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 3080 ~ 3094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2589	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 Takahashi Sanemichi Z.、 Omukai Kazuyuki	4. 巻 472
2. 論文標題 Primordial protostars accreting beyond the -limit: radiation effect around the star?disc boundary	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 532 ~ 541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx1988	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 Fukushima Hajime、 Omukai Kazuyuki、 Hosokawa Takashi	4. 巻 473
2. 論文標題 Upper stellar mass limit by radiative feedback at low-metallicities: metallicity and accretion rate dependence	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 4754 ~ 4772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stx2620	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22件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 大向一行
2. 発表標題 Formation of metal-poor stars
3. 学会等名 低金属度宇宙研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桐原 崇巨
2. 発表標題 星同士の詳細な合体条件の探求
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東翔
2. 発表標題 ミニハロー内の収縮する始原ガスコアにおける乱流の増幅
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東翔
2. 発表標題 収縮する始原ガスコアで増幅された乱流の飽和と散逸
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桐原崇巨
2. 発表標題 初代星原始星連星の合体機構
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東翔
2. 発表標題 収縮する始原ガスコアで増幅された乱流の飽和と散逸
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 Binary Star Formation at Low Metallicities
3. 学会等名 YKIS2019 "Black Holes and Neutron Stars with Gravitational Waves" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Susa
2. 発表標題 Number of population III stars per minihalo
3. 学会等名 FIRST STARS VI (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須佐 元
2. 発表標題 初期宇宙での星形成について -平成から令和へ-
3. 学会等名 第32回 理論懇シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Susa
2. 発表標題 Formation of PopIII binaries in minihalos
3. 学会等名 Joint symposium of MEXT innovative area x KONAN GAKUEN 100th Anniversary International Scientific Symposium Series Sponsored by The Hirao Taro Foundation of KONAN GAKUEN for Academic Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hajime Susa
2. 発表標題 Fragmentation of the accretion disk around PopIII stars
3. 学会等名 Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, 2nd Annual Symposium
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須佐 元
2. 発表標題 初代星降着円盤の分裂について
3. 学会等名 初代星初代銀河形成研究会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 町田正博
2. 発表標題 連星形成
3. 学会等名 初代星初代銀河形成研究会2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 From First Stars to First Black Holes
3. 学会等名 Gravitational wave physics and astronomy: Genesis, First Area Symposium
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 Status Report of A03 in FY2018: Quest for BH binary
3. 学会等名 The Second annual symposium of the innovative area "Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis"
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大向一行
2. 発表標題 宇宙初期の星形成におけるダストの役割
3. 学会等名 銀河の化学進化とダスト形成
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Susa
2. 発表標題 Stellar wind prevents the ISM gas from accreting onto the Pop III stars
3. 学会等名 Francesco 's Legacy: Star formation in Space and Time (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Gen Chiaki
2. 発表標題 Formation environment of Pop II stars affected by the feedbacks from Pop III stars
3. 学会等名 Francesco 's Legacy: Star formation in Space and Time (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 須佐元
2. 発表標題 初代星形成シミュレーションにおける星周円盤の分裂について
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 須佐元
2. 発表標題 初代星形成理論の現状
3. 学会等名 初代星初代銀河研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koki Higuchi
2. 発表標題 低金属量環境における星形成過程
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuyuki Omukai
2. 発表標題 Understanding primordial star formation: Francesco 's contribution
3. 学会等名 Francesco 's Legacy: Star Formation in Space and Time (招待講演) (国際学会)
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 分担者	町田 正博 (Machida Masahiro) (10402786)	九州大学・理学研究院・准教授 (17102)	
研究 分担者	大向 一行 (Omukai Kazuyuki) (70390622)	東北大学・理学研究科・教授 (11301)	

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
---------	---------