

機関番号：13901
領域設定期間：平成30年度～令和4年度
領域番号：6002
研究領域名（和文） 新しい星形成論によるパラダイムシフト：銀河系におけるハビタブル惑星系の開拓史解明
研究領域名（英文） A Paradigm Shift by a Novel Theory of Star Formation: Exploration of Habitable Planetary Systems in Our Galaxy
領域代表者
犬塚 修一郎 (Shu-ichiro Inutsuka)
名古屋大学・理学研究科・教授
研究者番号：80270453
交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,109,800,000円

研究成果の概要

進化する銀河系における星と惑星の形成過程を研究し、太陽系の起源についての新たな描像を得た。まず、銀河系内の大質量星や星団がほぼ例外なくハブ・フィラメント系と呼ばれる分子雲で生まれていることを突き止めた。また、銀河系の年齢に匹敵する時間スケールで星形成活動を継続可能にする銀河ハローと銀河円盤の相互作用の描像を得た。さらに、形成された星が銀河内で系統的に移動することを見出し、太陽系は銀河系において現在の位置より2kpcほど内側で形成されて外側に移動してきたことが強く示唆された。星形成の現場である分子雲コアの角運動量の起源、および、生まれたての星の周りにできる原始惑星系円盤の形成過程を解明した。さらに引き続き惑星形成の研究についても、ハビタブル惑星や若い惑星を含む系外惑星系を多数発見し、惑星形成過程や惑星大気についての研究も進め、今後の惑星科学のさらなる発展の土台を与えた。

研究分野：天文学/固体地球惑星物理学

キーワード：星形成/惑星形成/銀河進化/原始惑星系円盤/系外惑星/重元素/直接撮像/分光

1. 研究開始当初の背景

系外惑星科学の展開と課題 1995年の太陽系外惑星の発見以降、系外惑星科学はその研究者人口の急激な増加と共に急速に発展している。これまでに五千個を超える系外惑星候補が発見され、太陽系とは異なる極めて多様な惑星系の存在が明らかになり、我々の世界観は大きく変わった。系外惑星科学は天文学における最重要分野の一つに位置付けられただけでなく、太陽系のみを対象としてきた惑星科学に大きな多様性の扉を開いた。近年は生命を育む環境を備えたハビタブル惑星を天文学的手法で探索するという全く新しい領域の開拓にもつながっている。その結果、惑星形成論は天文学の枠に留まらず、周辺の関連分野を飲み込む規模で発展しており、**生命や惑星系の起源**という人類の根源的な問いに科学的にアプローチする分野を提供している。

惑星系のゆりかごである**原始惑星系円盤**の観測的研究では、すばる望遠鏡の戦略枠プロジェクトSEEDS(代表:田村)により、直接撮像法での系外惑星の発見やリング・渦状腕構造を示す原始惑星系円盤の発見など世界最先端の成果が挙げられた。SEEDSの観測に刺激され、永年重力不安定性により半径100AUで幅13 AUの**多重リング構造**が形成され、それが固体惑星や遠方ダスト円盤(デブリ円盤)に進化することを予言する理論が発表された(Takahashi & Inutsuka 2014)。その直後にALMAによりまさにその幅を持つ**多重リング構造**が若い星HL-Tauの円盤に発見された(図1f)。現在、HL-Tauの多数のリングの成因については論争が絶えないが、旧来の原始惑星系円盤の進化論から大きく異なる様相は衝撃的である。従来の惑星形成論を根底から覆す可能性を秘めているこれらの発見は惑星形成論の発展を激しく駆動している。

新しい星形成論 一方、赤外線衛星IRASによる原始星(生まれたての星)の観測や電波望遠鏡による分子雲観測の成果が出てきた1980年代以降、星の形成過程の研究は脈々と続いていた。しかし、小質量星から大質量星に渡る多様な星形成過程の理解は順調ではなかった。状況が一変したのは、欧州のハーシェル宇宙望遠鏡による近傍の星形成領域のサーベイ観測結果が発表さ

れたことである。その内容は「星形成は線密度が臨界値を超えるフィラメント状分子雲で始まる」とまとめられる極めて簡潔な結論であった(音速 C_s 、重力定数 G を用いて臨界値は $2C_s^2/G$ であり、ほぼ定数)。実は、その内容は領域代表者らが過去に発表していた論文(Inutsuka & Miyama 1992, 1997)で予言していたものであったため、それに続く理論的研究の複数の予言が直接検証されるという流れが生じた。実際、フィラメント状分子雲の線密度構造分布が分子雲コアの質量関数を決めるという領域代表者の論文(図 1d, Inutsuka 2001)の予言が定量的にハーシェルの観測データ解析から証明され(Roy, Andre, Arzoumanian et al. 2015)、星の初期質量関数の起源の研究が一気に進んだ。さらに ALMA 望遠鏡の登場により、分子ガスの空間・速度分布の超精密観測が可能となり、フィラメント状分子雲の形成過程の基本的理解が大きく進むものと期待される。また、様々な電波望遠鏡がその ALMA の最新技術を導入することにより、観測効率を劇的に向上させている。

本領域の計画研究 A01 メンバーらは基礎物理過程に基づき高密度分子雲コアから原始星・原始惑星系円盤が形成される過程を統一的に記述する計算をほぼ貫徹している(図 2e, レビューは Inutsuka 2012 等)。その結果に基づく新しい惑星形成論は今まさに展開されつつある(例えば Ogihara et al. 2013, 2014, 2015, 2016 等)。また、計画研究 A02 のメンバーらは物質科学的なアプローチを含む本格的なダスト粒子のミクロスケール・シミュレーションを実行し、現実的な微惑星形成過程の筋道を切り開きつつある(Okuzumi et al. 2012 等)。これら理論研究の展開はこれまでの分子雲・原始惑星系円盤・系外惑星の観測結果から刺激されてきたが、既存の観測データだけで急速な進展を見せる惑星形成論を検証することは、もはや不可能である。多様な惑星系の本質に迫るためには、斬新な理論に基づく新しい動機によって観測領域や手法を選択的に拡大する必要がある。

2. 研究の目的

新しい星形成論に基づき、銀河スケールでの星と惑星研究にパラダイムシフトをもたらす、銀河系におけるハビタブル惑星系の開拓史を解明する新領域 地球のような岩石惑星は重元素で構成されているため、重元素が存在しなかった宇宙初期の銀河形成期にはハビタブル惑星は形成不可能であった。星が生まれ、その中で重元素が合成されて星間空間にばらまかれることで、惑星形成可能な環境が整えられたのである。それは銀河中心領域より外側に広がっていくという進化をしたと考えられるため、銀河進化によりハビタブル惑星形成可能な環境が「開拓」されたことになる。従来の星形成や原始惑星系円盤の研究は数百万年程度の「つい最近」の現象を扱ってきた。この時間窓は銀河系の歴史において右端の僅かな時間間隔にしか過ぎない。一方、太陽系は銀河系の年齢の半分弱に相当する 46 億年程度前に形成されたと考えられているが、太陽の重元素量は現在の近傍ガスの平均値よりもむしろ大きい。太陽系が生まれた頃の重元素量は現在の半分強程度と推測されるため、太陽は近傍のガス雲の重元素量に比べてかなり高い重元素量を持つと言える。さらに太陽系の構成物質には超新星爆発によってのみ作られる元素の同位体の崩壊核が含有されているため、超新星爆発を起こした星団の中で太陽系が作られたと推察される(Gounelle, Meibom, Hennebelle, & Inutsuka 2009 等)。従って、一つの仮説として、太陽系は銀河中心領域の重元素量の大きな星団内で生まれ、現在の位置まで外側に移動してきた可能性が浮上する。実際、種々の金属量を持つ星の分布を記述する銀河系の化学進化に関する最新の計算によれば、かなりの星は長い時間をかけて外側に移動することが示唆されており、太陽系の誕生場所は銀河中心から 4.4~7.7kpc 程度の場所であろうと見積もられている(Minchev et al. 2013 等)。一方、化学進化の解釈から逆算された銀河系の星形成の歴史によれば、約 80 億年前に星形成は不活発なモードに移行したことが分かっており、これらが太陽系誕生の初期条件を示唆している。このように、現実の太陽系の誕生過程を探るには、宇宙そのものの年齢の時間ス

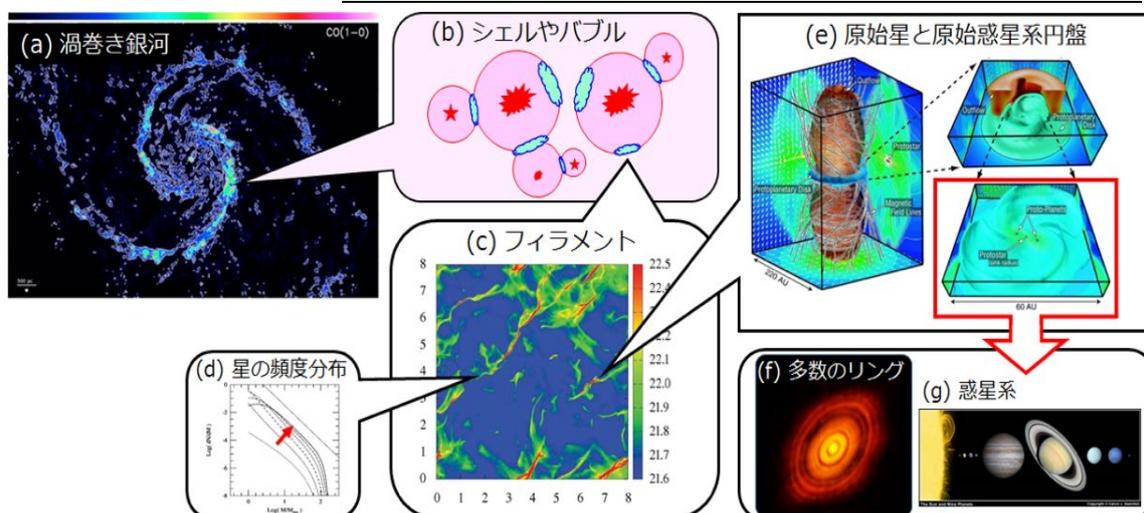


図 1：銀河スケールでの星と惑星の形成

ケールに匹敵する銀河系進化の中での多様な惑星形成を理解する、というパラダイムシフトが必要なのである。そして、銀河進化から惑星形成までを正しく理解するための根本となる新しい星形成論を手にした今まさにその研究は可能になったと我々は強く実感している。本新学術領域研究の目的は、銀河スケールでの星形成活動を理解し、進化する銀河系の中で多様な惑星系の形成・進化を解明すること、特に太陽系がどのような場所・環境で生まれ、何を経験してきたのかを突き止め、真の太陽系の起源を理解することである。さらに、太陽を生んだ星団の他の星、つまり太陽の兄弟星の分布や、太陽系のような生命を育める惑星系の形成領域分布についての描像を確立し、惑星系観測・探索の機軸を構築する。この新しい挑戦的研究テーマについて、対応する天文学・宇宙物理学のすべての分野の専門家が協力して組織された本研究領域の6つの計画研究により解明する。

3. 研究の方法

図2のように、本新学術領域には以下の3つのテーマについて6つの研究項目がある。それぞれの研究項目は、「銀河スケールでの星形成に関する理論(研究項目 A01)・観測(研究項目 B01)」「様々な環境下における円盤進化と惑星形成に関する理論(研究項目 A02)・観測(研究項目 B02)」「系外惑星やその大気に関する理論(研究項目 A03)・観測(研究項目 B03)」について理論的手法と観測的手法で協調しながら研究を行う。そして、それぞれの研究項目の計画研究は、図2に記載されている科学的目標の達成を目指す。そのために、計画研究間での科学的な結びつきを重視し、共同研究により研究を進めた。

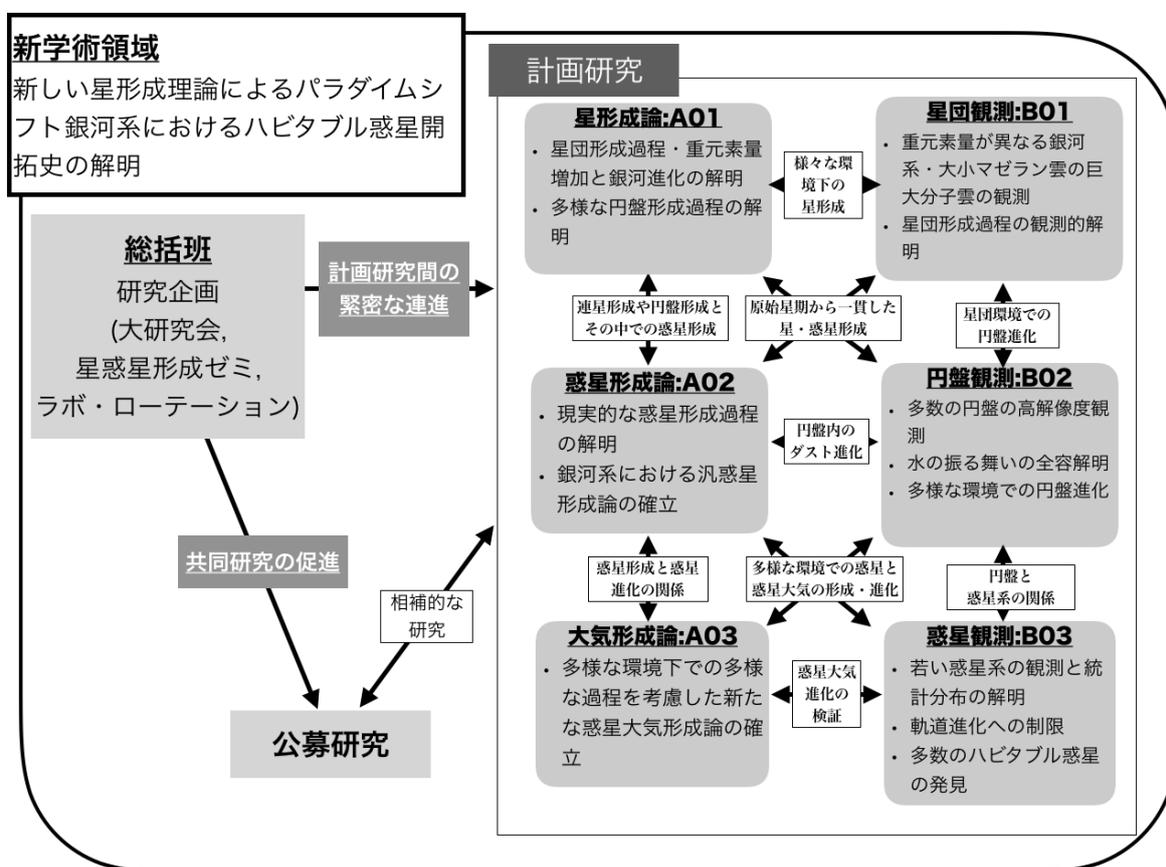


図2：研究組織と計画研究

4. 研究の成果

5年間の研究期間で多数の成果が得られた。以下で、代表的な成果をそれぞれの研究項目ごとにまとめる。

研究項目 A01 では、銀河系内の大質量星や星団がハブ・フィラメント系と呼ばれる分子雲で生まれていることを突き止めた。その構造は犬塚らが提唱する星形成のバブル・フィラメント・パラダイムで理論的に説明した。また、銀河系の年齢に匹敵する時間スケールで星形成活動を継続可能にする銀河ハローと銀河円盤の相互作用の描像を描いた。さらに、形成された星が銀河内で移動することを解明し、太陽系が銀河系の内側で形成され、外側に移動してきたことを理論的に説明することができた。また、星形成の現場である分子雲コアの角運動量の起源を解明し、生まれたての星の周りにできる原始惑星系円盤の形成過程についても詳細に記述して、研究項目 A02

の研究の基盤を与えた。

研究項目 B01 では、銀河進化と共に変化する重元素量を鍵として星・星団形成の観測的理解を目指していた。計画研究で開発する望遠鏡も含め、大小様々な望遠鏡を駆使して、星団形成の母体となる分子雲の徹底的な詳細観測を実行し、それと比較すべき原始星・原始星団の分布・性質を明らかにする。具体的には以下の3つである。(1)広帯域電波分光システムの開発に成功し、1.85m望遠鏡に搭載しての観測を実現した。アルマ望遠鏡を初めとする大型電波望遠鏡の広帯域化の基礎となる技術開発である。(2)TAOに搭載されるカメラ:MIMIZUKUの性能向上を進め、すばる望遠鏡でのファーストライトを達成し、カメラの性能向上の開発にも成功した。(3)国内外の大小ミリ波・サブミリ波望遠鏡の新規・アーカイブデータも駆使し、分子ガスの詳細な性質を巨大分子雲から個々の星形成のスケールまで広範かつ連続的に調べ、理論研究との比較も実施してきた。例えば、ALMAを用いた大小質量星形成領域・超新星残骸の高分解能観測、45m鏡・ASTE等を用いた銀河系・系外銀河の観測を通して、フィラメント構造を含む星形成につながる星間物質の多様性を明らかにしてきた。

研究項目 A02 では、計算機シミュレーションによる理論研究により、(i)微惑星形成の素過程、(ii)惑星形成の素過程、として原始惑星系円盤から惑星に至るまでの形成の重要素過程を明らかにし、(iii)汎惑星形成理論と太陽系の起源、としてそれらを総合し、新たな惑星形成理論を構築することを推進した。(i)と(ii)の研究では、計画していた全ての項目について成果を出している。(i)として、ダストの成長・移動モデルの構築、ダストの衝突合体・破壊とペブル生成モデルの構築、ダスト、微惑星、ペブルの統合モデルと円盤観測との比較のそれぞれについての成果を得た。また、(ii)については、微惑星の衝突・破壊過程、微惑星の局所集積、材料物質の移動を考慮した集積、ガス惑星の形成、近接スーパーアース系の形成のそれぞれについて成果が得られた。(iii)については、解明した素過程を組み込んだ、惑星種族合成モデル、統計的惑星形成モデルを開発した。

研究項目 B02 では、円盤構造を探る対象天体を拡張し、系外惑星の多様性の起源に及ぼす影響を解明することを目標とした。具体的な達成目標は以下の3点であった。(A)多様な惑星形成モードの解明:円盤の詳細観測を通じて、ダスト成長を経た微惑星集積による形成モードだけでなく、円盤の自己重力不安定による惑星誕生モードの発現条件を解明する。(B)水の振る舞い:電波と中間赤外線との協働により、円盤スノーラインを観測的に同定し、これらの結果を理論モデル計算と比較して、円盤内の水の振る舞いの全容を解明する。(C)幅広い環境下での惑星形成:重元素量や紫外線強度が異なる環境下にある円盤のサーベイ観測に基づき、大局的な円盤進化が重元素量や輻射場の強さにどう影響されるかを解明する。関連して、京大 3.8m せいめい望遠鏡用に近赤外線偏光撮像装置を開発する。

提案段階では、領域期間内にせいめい望遠鏡新装置を立ち上げ、さらに『100個以上の円盤を含む星団を10個以上の観測を行う』目標を掲げていた。新型コロナウイルス拡大の影響もあり、装置の立ち上げは進捗しているものの、大規模な科学観測の実行までには至っていない。一方で、それ以外の提案段階の目標はおおむね予定通り達成している。特にスノーラインに関連して、当初は水のスノーラインにのみ着目していたが、COやCO₂スノーラインが円盤ガス中のC/O比の変化に関与しうる点を明らかにしたことは、系外惑星大気の起源の研究に寄与する当初目標を超えた到達といえる。

研究項目 A03 では、これまでとは桁違いの数の系外惑星に対してトランジット観測を行い、惑星の構成成分および大気の特徴を観測的に制約し、最新の惑星形成の理解を組み込むことで大気形成論を再構築し、系外惑星大気に関する統計的特徴とその成因を解明することを目標とした。また、構築された理論を用いて、太陽系外におけるハビタブル惑星の存在度を予測することを目指した。そのために、可視光多色撮像装置を経度方向に世界3地点に設置し、24時間観測可能なネットワーク観測システムを構築した。そして、2018年4月に打ち上げられたNASAのTESS宇宙望遠鏡による惑星候補サーベイに対して大規模なフォローアップ観測を行い、主に赤色矮星周りの惑星を数多く検出することに成功した。そのなかには、ハビタブルゾーン内に位置する惑星も存在する。理論面では、水素主成分とする原始惑星系円盤ガスからの大気獲得過程および散逸過程に対して、重元素の効果に着目して詳細に調べた。

研究項目 B03 では、低温度天体の観測に有利な赤外線を利用して、若い惑星およびハビタブル惑星観測に新機軸を打ち立てることを目標とした。そのために、赤外線観測好適地に位置する南アフリカ天文台の望遠鏡を整備しつつ赤外線分光観測装置を製作し、並行して、すばる望遠鏡なども利用しつつ太陽近傍の赤色矮星や若い恒星のまわりの惑星を探索することを目指した。その結果、すばる望遠鏡、K2ミッションフォローアップ、TESSフォローアップ等による観測を推進し、並行して南アフリカ天文台に観測設備を準備する事業を推進した。観測装置としては、現在建設中の大阪大学の口径1.8m望遠鏡PRIMEと、名古屋大学等の口径1.4m望遠鏡IRSFの改修を進め、これらにファイバーリンク可能な高分散分光器の開発を進めた。また、すばる望遠鏡用分光器の波長校正装置のアップグレードによる短波長化を完成した。

5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

- Misugi, Y. Inutsuka, S.; Arzoumanian, D., 2023, "Evolution of the Angular Momentum of Molecular Cloud Cores Formed from Filament Fragmentation", *ApJ*, 943, 76.
- Komatsu, Y., ...Tamura, M. (全11名), 2023, Photosynthetic Fluorescence from Earthlike Planets around Sunlike and Cool Stars, *Astrophys. J.*, 942, id.57, 16 pp.
- Shimoda, J., Inutsuka S., 2023, "The Effects of Cosmic-Ray Diffusion and Radiative Cooling on the Galactic Wind of the Milky Way", *ApJ*, 926, 8, 14 pp.
- Fujimoto, Y., Inutsuka, S., Baba, J., 2023 "Efficient radial migration by giant molecular clouds in the first several hundred Myr after the stellar birth", *MNRAS*, 523, 3049
- Arakawa, S., & Kokubo, E., 2023, "Number of stars in the Sun's birth cluster revisited", *A&A*, 670, A105
- Orihara, R., Momose, M., Muto, T., ... (全13名), 2023, ALMA Band 6 high-resolution observations of the transitional disk around SY Chamaeleontis, *PASJ*, 75, pp. 424-445.
- Kumar, M.S.N., Arzoumanian, D., Men'shchikov, A. & Inutsuka, S., 2022, "Filament coalescence and hub structure in Mon R2. Implications for massive star and cluster formation", *Astronomy & Astrophysics*, 658, A114 (12pp)
- Nakayama, A., Ikoma, M., & Terada, N., 2022, Survival of terrestrial N2-O2 atmospheres in violent XUV environments through efficient atomic line radiative cooling, *Astrophys. J.*, 937, id.72, 18 pp.
- Tokuda, K., Zahorecz, S., Kunitoshi, Y., Higashino, K., ..., Onishi, T. (14番目), & Machida, M. N. (全15名), 2022, "The First Detection of a Protostellar CO Outflow in the Small Magellanic Cloud with ALMA", *ApJ*, 936, L6
- Kimura, T. & Ikoma, M., 2022, Predicted diversity in water content of terrestrial exoplanets orbiting M dwarfs, *Nature Astronomy*, 6, 1296-1307.
- Currie, T., ...Tamura, M., ...Kotani, T. ,... (全33名), 2022, Images of embedded Jovian planet formation at a wide separation around AB Aurigae, *Nature Astronomy*, 6, p. 751-759.
- Miret-Roig, N., ...Tamura, M. ,... (全12名), 2022, A rich population of free-floating planets in the Upper Scorpius young stellar association, *Nature Astronomy*, 6, p. 89-97.
- Trifonov, T., ..., Fukui, A., ..., Narita, N., ... (全69名), 2021, A nearby transiting rocky exoplanet that is suitable for atmospheric characterization, *Science* 371, pp. 1038-1041
- Kobayashi, H., Tanaka, H., 2021, "Rapid Formation of Gas-giant Planets via Collisional Coagulation from Dust Grains to Planetary Cores", *ApJ*, 922, id.16
- Okamura, T., Kobayashi, H., 2021, "The Growth of Protoplanets via the Accretion of Small Bodies in Disks Perturbed by the Planetary Gravity", *ApJ*, 916, id.109
- Inutsuka, S.. 2020 "Star Formation in The Galactic Disk and The Galactic Center" in *Astronomical Society of the Pacific Conferences Series "New Horizons in Galactic Center Astronomy and Beyond" ASP Conf. Ser.*, 528, 271
- Kobayashi, H., Isoya, K., & Sato, Y., 2019, "Importance of Giant Impact Ejecta for Orbits of Planets Formed during the Giant Impact Era", *ApJ*, 887, 226
- Tamura, M., 2019, *Extrasolar Planetary Systems*, In *Astrobiology*, ISBN 978-981-13-3638-6. Springer Nature.
- Misugi, Y., Inutsuka, S.. & Arzoumanian, D. 2019, "An Origin for the Angular Momentum of Molecular Cloud Cores: A Prediction from Filament Fragmentation", *ApJ*, 881, 11.
- Iwasaki, K., Tomida, K., Inoue, T., Inutsuka, S., 2019, "The Early Stage of Molecular Cloud Formation by Compression of Two-phase Atomic Gases", *The Astrophysical Journal*, 873, 6
- Harada, R., Onishi, T., ..., Tachihara, K. (11番目),..., & Stephens, I. W. (全17名), 2019, "Formation of high-mass stars in an isolated environment in the Large Magellanic Cloud", *PASJ*, 71, 44
- Livingston, J. H., ...Tamura, M., ... (全34名), 2018, 44 Validated Planets from K2 Campaign 10, *Astron. J.*, 156, id. 78
- Tsukamoto, Y., Okuzumi, S., Iwasaki, K., Machida, M. N., Inutsuka, S., 2018, "Does Misalignment between Magnetic Field and Angular Momentum Enhance or Suppress Circumstellar Disk Formation?", *The Astrophysical Journal*, 868, 22.

ホームページ等

<http://star-planet.jp>