

機関番号：	13901
領域設定期間：	2018～2022 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 New Integrated Theory of Star Formation: Expanding Frontier of Habitable Planetary Systems in Our Galaxy
領域代表者	犬塚 修一郎 (Shu-ichiro Inutsuka) 名古屋大学大学院・理学研究科・教授 研究者番号：80270453
交付決定（予定）額（領域設定期間全体）：（直接経費）	1,109,800 千円

研究の概要

継続する星形成と重元素合成・放出により固体惑星の材料物質分布は銀河中心領域から外側に広がってきた。この銀河進化によりハビタブル惑星が生まれる環境が銀河系の内側から外側へ「開拓」された。約46億年前に生まれた太陽系の起源・進化を探るためには、現在とは異なる太陽系誕生の環境を理解することが必須であり、宇宙年齢に匹敵する時間スケールでの銀河系の進化を理解する必要がある。そのため、銀河系円盤部における星形成論の新しい枠組みを進展させ、銀河系スケールでの星団形成活動を記述する。また、関連研究者の総力を結集して、進化する銀河系における多様な惑星系の形成論を構築し、現環境とは異なる初期状態を起点とする太陽系史研究へとパラダイムシフトを導く。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、太陽系のように生命を育む惑星系の形成領域分布の描像を確立し、惑星系観測の新機軸を構築する。

研究分野：天文学・宇宙惑星科学

キーワード：銀河系進化，星形成，惑星形成，原始惑星系円盤，系外惑星，ハビタブル惑星

1. 研究開始当初の背景

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、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った。今や、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。一方、日本では系外惑星の発見の前から太陽系形成論が発達していた。これは(故)林忠四郎博士の先駆的な研究に導かれたものであり、基礎物理学に基づく演繹的な方法論で優れた理論的成果を挙げている。しかし、系外惑星系の発見以降、多様な観測に応じた多数の現象論的な研究が世界で乱立しており、惑星形成論は混迷を極めていと言わざるを得ない。特に固体惑星の形成材料となる微惑星の形成シナリオが確立していない。この困難の根源は惑星形成の舞台である原始惑星系円盤の形成・進化過程が確立していないことにある。つまり、星形成過程に引き続く現象を詳細に理解することが必須なのである。一方、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。46億年前の太陽系の誕生過程を探るには、宇宙年齢の時間スケールにおける銀河系進化の中で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である。

2. 研究の目的

銀河系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。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・宇宙物理学の全ての分野の専門家が協力する。

3. 研究の方法

本領域は、六つの研究項目により上記の研究目的の達成を目指す。星形成論(A01):星団形成過程重元素増加と銀河進化の解明。多様な原始惑星系円盤形成の解明。惑星形成論(A02):現実的な惑星形成過程の解明。銀河系における汎惑星形成論の確立。大気形成論(A03):多様な環境下での多様な過程を考慮した新たな惑星大気形成論の確立。星団観測(B01):重元素が異なる銀河系及び大小マゼラン雲の巨大分子雲の観測。星団の形成過程の観測的解明。円盤観測(B02):多数の円盤の高解像度観測。「水」の振る舞いの全容解明。多様な環境下での円盤進化。惑星観測(B03):若い惑星系の観測と統計分布の解明。惑星の軌道進化への制限。ハビタブル惑星の発見。

さらに、計画研究ではカバーできない相補的な役割を果たす研究テーマを公募する。全体として、計画研究の枠にとらわれない、幅広い研究を推進する。

4. 研究の進展状況及び成果

星形成の理論研究に関しては、まず、近年太陽系近傍に関して提唱した最新の星形成理論を、高圧・高温の極端な環境である銀河中心領域に応用する研究を論文としてまとめ、今後の観測により理論的予言を検証する方法を示した。また、星形成活動により誕生する天体の角運動量の起源を解明した。種々の優れた磁気流体力学的数値計算法についても発展させた。Gaia データを利用した銀河系の進化史についての研究も進んでいる。さらに、本新学術領域の最大のテーマの一つである「太陽系の誕生場所を突き止める」という課題に関して、現在の地球上にも(寿命が百万年程度の放射性同位体である)原子量 60 の Fe が降り注いでおり、その観測量を再現するには超新星爆発の影響を強く受ける環境に長時間滞在する必要があることを見出した。この制限から太陽系は銀河系のもっと内側で生まれて外側に移動してきたことを定量的に推定する方法を考案した。

惑星形成の理論研究では、これまで微惑星形成、惑星形成の重要素過程を計画通り、主に数値計算を用いて解明してきた。特に、惑星形成の最重要課題である微惑星形成については、有機物に覆われた岩石ダストの付着成長による形成、雪線での岩石ダスト濃集による形成、という新しい機構を発見した。また、惑星系の多様性を生み出す惑星移動について、ガス円盤との重力相互作用による移動の新たなモデルを構築した。

惑星大気研究に関しては、円盤ガス獲得成分と脱ガス成分の混合による大気形成過程を精査し、さらに惑星形成素過程等の最新の理解と組み合わせ、太陽系外のハビタブルゾーンにも地球と同程度あるいはそれ以上の海水を持つ地球型惑星が形成可能であることを示した。一方、独自の理論予測の検証のために、TESS 惑星候補を集中的に追観測するネットワーク観測体制の整備が順調に進んでいる。既存の MuSCAT1,2 を用いた追観測では M 型星まわりでハビタブル惑星候補や超短周期の巨大ガス惑星を発見した。また、MuSCAT3 は装置の開発・試験が完了し、2020 年 7 月にハワイ・マウイ島の観測所に輸送し、ファーストライトを迎えようとしている。

星・星団形成のもとになる分子雲の観測では、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、等を通して、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。広範な分子雲探査、深く埋もれた原始星の高分解能観測を実現するため、1.85m 電波望遠鏡や TAO 望遠鏡に搭載される中間赤外線測光観測装置 MIMIZUKU の南米チリでの観測に向けた移設準備、開発、装置の試験は順調に進んでいる。

円盤観測では、周惑星円盤の兆候とみられる構造を発見したほか、複数の円盤で微惑星形成の鍵を握るダスト集積領域を検出した。さらに、ダスト散乱を考慮するとダスト柱密度の見積りが大幅に高くなることを指摘し、これまで考えられていたよりも後期の進化段階での巨大惑星形成が起こりうることを示した。また円盤内の水については、氷を含むダスト粒子のサイズやスノーラインの位置を制限する成果を得た。星団環境にある円盤の性質を調べるための京大せいめい望遠鏡撮像装置も計画通りに開発が進み、装置の組み上げと試験観測へと進む準備が整った。

系外惑星の観測では、すばる望遠鏡を用いた観測と NASA の K2 および TESS ミッションのフォローアップ観測を推進した。その結果、若い惑星や近傍 M 型星を含む系外惑星を短期間で合計百個以上発見した。7つの地球型惑星を持つ低質量の恒星 TRAPPIST-1 に対する IRD を用いた観測によって、地球型かつハビタブルゾーンにある惑星の公転軸と恒星の自転軸がほぼそろっていることを初めて解明した。装置開発としては、現在建設中の大阪大学の口径 1.8m 望遠鏡 PRIME と、稼働中の名古屋大学等の口径 1.4m 望遠鏡 IRSF にファイバーリンク可能な高分散分光器の詳細な詳細設計を行い、心臓となる赤外線検出器も確保した。

5. 今後の研究計画

オンラインゼミを毎月開催しているが、最新の星形成理論等についての知識・理解を研究分担者やその共同研究者や学生と共有するため、さらに規模を大きくした研究会をなるべく数多く開催する。その結果、銀河系円盤部の種々の場所での星団形成論を研究し、銀河系円盤の進化を理論的に調べる。また、その結果を Gaia のデータと比較して銀河系の化学進化の理解を確立する。また、世界的に研究が発展していない「連星系における原始惑星系円盤の形成」についても取り組み、連星系における惑星形成についても研究する土台を与える。

惑星形成の理論研究では、汎惑星形成理論と太陽系の起源、の研究に本格的に取り組む。形成の素過程の新しい知見を惑星種族合成モデル、大規模多体計算、統計的計算に組み込み、それを様々な銀河系環境や中心星、原始惑星系円盤に応用することで可能な惑星系の多様性を理解する。そして理論モデルと観測を比較することで、理論の較正を行い、汎惑星形成理論を完成させる。このモデルを

用いて、観測される惑星系の起源を説明し、新たな惑星系の予言を行い、ハビタブル惑星の形成条件を明らかにする。そして、太陽系の起源、すなわちどのような原始惑星系円盤からどのようにして太陽系が誕生したのかを明らかにする。

系外惑星の大気に関する研究では、完成した MuSCAT1-3 を用いて TESS 惑星候補の集中的な追観測を行い真の惑星を発見する。また、すばる望遠鏡等を用いて惑星大気の特徴づけを進める。そうして得られた観測事実と理論予測を比較することで、現在の理論の不足点・問題点を洗い出し、大気形成モデルの修正および、星形成や惑星形成に関する理論研究へフィードバックを行う。こうした系外惑星大気に関する研究における理論と観測の密な連携および隣接研究項目との共同によって得られる洗練された大気形成論に基づき、ハビタブル惑星系の形成過程および銀河系における存在確率を明らかにする。

1.85m 電波望遠鏡や TAO 望遠鏡に搭載される中間赤外線測光観測装置 MIMIZUKU による観測を実現し、重元素量が異なる銀河系・大小マゼラン雲の巨大分子雲の物理状態・原始星形成の様子をはじめ詳細に明らかにすることにより、宇宙の進化に伴う星団・星形成の初期条件を探る。国内外の大小ミリ波・サブミリ波・赤外線望遠鏡の新規・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る。

円盤観測では当初計画に沿った活動の他、新展開の芽を適宜取り込む。高解像観測では、これまでの継続に加え、新たな展開として、電波干渉計データの新しい解析手法の確立や残骸円盤の統計的性質の研究を推進する。円盤内の水については、水氷や水蒸気を様々な進化段階の円盤で捉え、水が円盤へ持ち込まれる過程やスノーラインについての多角的情報を得る。せいめい望遠鏡のための新装置は令和 3 年度から科学観測を開始し、星団領域を中心に、星・惑星形成過程の金属量依存性を探究する。新たな展開としては、星形成領域から離れた領域に発見された円盤付随天体の起源を探るための研究を推進する。

系外惑星観測については、開発に専念する研究員および既存の装置を利用しつつ観測を推進する研究員も確保しており、開発・観測を並行して推進する。分光器を取り付ける南アフリカの望遠鏡のうち、現在稼働中の IRSF 望遠鏡のリモート化のための望遠鏡制御系整備を進めると共に、現在建設中の PRIME 望遠鏡の完成を待ち、分光器の搬入はその後に行う。すばる望遠鏡 IRD による M 型星まわりの惑星探査を戦略的観測として継続して推進する。

6. 主な発表論文等（受賞等を含む）

- Sugiura, K., Kobayashi, H., & Inutsuka, S., 2020, *Planetary and Space Science*, 181, 104807.
- Misugi, Y., Inutsuka, S., & Arzoumanian, D. 2019, *ApJ*, 881, 11.
- Hennebelle, P., Inutsuka, S., 2019, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 6, 5.
- Tsukamoto, Y., Okuzumi, S., Iwasaki, K., Machida, M. N., Inutsuka, S., 2018, *ApJ*, 868, 22.
- Inoue, T., Hennebelle, P., Fukui, Y., Matsumoto, T., Iwasaki, K., Inutsuka, S., 2018, *PASJ*, 70, S53.
- Ogihara, M., Kokubo, E., Suzuki, T. K., & Morbidelli, A., 2018, *A&A*, 615, A63,
- Homma, K. A., Okuzumi, S., Nakamoto, T., & Ueda, Y., 2019, *ApJ*, 877, 128.
- Hyodo, R., Ida, S., & Charnoz, S., 2019, *A&A*, 629, A90.
- Tanaka, H., Murase, K., & Tanigawa, T., 2020, *ApJ*, 891, 143.
- Kimura, T. & Ikoma, M., 2020, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, in press.
- Hori, Y. & Ogihara, M., 2020, *The Astronomical Journal*, 889, id.77.
- Parviainen, H., Palle, E., Zapatero-Osorio, M. R., Montanes Rodriguez, P., Murgas, F., Narita, N.,... (全 40 名), 2020, *Astronomy & Astrophysics*, 633, A28.
- Muraoka, K., Sorai, K.,... (全 28 名), 2019, *PASJ*, 71, S15,
- Tokuda, K., Fukui, Y., ..., Inoue, T. (6 番目), ..., Onishi, T. (21 番目; 全 21 名), 2019, *ApJ*, 886, 15
- Harada, R., Onishi, T., Tokuda, K., ..., (全 17 名), 2019, *PASJ*, 71, 44,
- Tsukagoshi, T., Muto, T., Nomura, H., et al. 2019, *ApJL*, 878, L8
- Soon, K.-L., Momose, M., Muto, T. et al. 2019, *PASJ*, 71, 124
- Yasui, C. et al. 2019, *ApJ*, 886, 115
- Hirano, T., ... Kotani, T., Tamura, M., ... (全 21 名), 2020, *ApJL*, 890, L27
- Livingston, J. H., ... Tamura, M., ... (全 16 名), 2018, *AJ*, 156, id. 277
- Tamura, M., 2019, "Extrasolar Planetary Systems", In *Astrobiology*, Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- 2019.3.16 第 30 回日本天文学会研究奨励賞受賞 武藤恭之
- 2020.3.17 第 24 回日本天文学会林忠四郎賞受賞 犬塚修一郎

ホームページ等

<http://www.ta.phys.nagoya-u.ac.jp/star/>