

---

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

---

領域番号:6002

領域略称名:星惑星形成

平成30年度～令和4年度 科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
研究成果報告書

令和6年6月

領域代表者 犬塚修一郎

名古屋大学大学院・理学研究科・教授

## はしがき

我々の住処である太陽系を含む円盤銀河の一つが銀河系であり、天の川銀河とも呼ばれる。この銀河系の中では、宇宙年齢に匹敵する時間スケールに渡って星の形成がゆっくりと続いてきた。継続した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。これが銀河系の進化である。この進化とともに生命を宿しうるハビタブル惑星が生まれる環境は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。本新学術領域では、近年我々が手にした銀河系円盤部における星形成論の新しい枠組みを発展させ、銀河系スケールでの星団形成活動の種々の側面を詳細に解明した。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導いた。特に、太陽系が銀河系の現在場所よりもずっと内側で形成され、外側に移動してきたとする仮説を補強する数多くの研究成果を得た。また、国内外での観測装置の開発を通じて、今後の系外惑星系観測の新機軸をもたらした。

**研究組織** (令和 5 年 3 月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

領域代表者 犬塚修一郎 (名古屋大学大学院・理学研究科・教授)

### 総括班(X00)

研究代表者 犬塚修一郎 (名古屋大学大学院・理学研究科・教授)

研究分担者 小林浩 (名古屋大学大学院・理学研究科・准教授)

研究分担者 松本倫明 (法政大学・人間環境学部・教授)

研究協力者 小久保英一郎 (国立天文台・科学研究部・教授)

研究協力者 生駒大洋 (国立天文台・科学研究部・教授)

研究協力者 大西利和 (大阪府立大学・理学系研究科・教授)

研究協力者 百瀬宗武 (茨城大学・理工学研究科・教授)

研究協力者 田村元秀 (東京大学大学院・理学系研究科・教授)

## 計画研究

### A01 班

研究代表者 犬塚修一郎 (名古屋大学大学院・理学研究科・教授)

研究分担者 千葉柁司 (東北大学・理学研究科・教授)

研究分担者 松本倫明 (法政大学・人間環境学部・教授)

研究分担者 長島雅裕 (文教大学・教育学部・教授)

研究分担者 諏訪雄大 (東京大学大学院・総合文化研究科・准教授)

研究分担者 塚本裕介 (鹿児島大学・理工学域理学系・准教授)

#### A02 班

- 研究代表者 小久保英一郎（国立天文台・科学研究部・教授）
- 研究分担者 井田茂（東京工業大学・ELSI・教授）
- 研究分担者 奥住聡（東京工業大学・理工学研究科・准教授）
- 研究分担者 小林浩（名古屋大学大学院・理学研究科・准教授）
- 研究分担者 田中秀和（東北大学大学院・理学研究科・教授）
- 研究分担者 長澤真樹子（久留米大学・医学部・教授）

#### A03 班

- 研究代表者 生駒大洋（国立天文台・科学研究部・教授）
- 研究分担者 寺田直樹（東北大学大学院・理学研究科・教授）
- 研究分担者 成田憲保（東京大学大学院・総合文化研究科・教授）
- 研究分担者 堀安範（自然科学研究機構・アストロバイオロジーセンター・助教）

#### B01 班

- 研究代表者 大西利和（大阪公立大学・理学研究科・教授）
- 研究分担者 宮田隆志（東京大学大学院・理学系研究科・教授）
- 研究分担者 ゴンサレス・アルバロ（国立天文台・ALMAプロジェクト・准教授）
- 研究分担者 村岡和幸（大阪公立大学・理学研究科・准教授）
- 研究分担者 井上剛志（甲南大学・理工学部・教授）
- 研究分担者 富田賢吾（東北大学大学院・理学研究科・准教授）
- 研究分担者 立原研悟（名古屋大学大学院・理学研究科・准教授）

#### B02 班

- 研究代表者 百瀬宗武（茨城大学・理工学研究科・教授）
- 研究分担者 武藤恭之（工学院大学・教育推進機構・准教授）
- 研究分担者 野村英子（国立天文台・科学研究部・教授）
- 研究分担者 本田充彦（岡山理科大学・生物地球学部・准教授）
- 研究分担者 長田哲也（京都大学大学院・理学研究科・教授）
- 研究分担者 安井千香子（国立天文台・TMT プロジェクト・助教）
- 研究分担者 木野 勝（京都大学大学院・理学研究科・助教）

#### B03 班

- 研究代表者 田村元秀（東京大学大学院・理学系研究科・教授）
- 研究分担者 小谷隆行（自然科学研究機構・アストロバイオロジーセンター・准教授）
- 研究分担者 永山貴宏（鹿児島大学・理工学域理学系・准教授）
- 研究分担者 栗田光樹夫（京都大学大学院・理学研究科・准教授）
- 研究分担者 佐藤文衛（東京工業大学・理学研究科・教授）

公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	19H05075 超新星残骸に付随するフィラメント状分子雲の探究	令和元年度 ～ 令和2年度	佐野 栄俊	名古屋大学・助教	1
A01 公	19H05076 銀河系ハビタブルゾーン：化学進化からのアプローチ	令和元年度 ～ 令和2年度	竹内 努	名古屋大学・理学系・准教授	1
A01 公	19H05085 分子雲における星間ダスト進化モデルの構築	令和元年度 ～ 令和2年度	木村 宏	千葉工業大学・研究員	1
A02 公	19H05071 Water Delivery, Composition and Formation	令和元年度 ～ 令和2年度	ブラサー ラモン	東京工業大学・准教授	1
A02 公	19H05073 隕石から探る木星型惑星大移動説	令和元年度 ～ 令和2年度	癸生川 陽子	横浜国立大学・工学系研・准教授	1
A02 公	19H05077 乱流磁場を持つ原始惑星系円盤における宇宙線粒子の伝播とガスの電離	令和元年度 ～ 令和2年度	藤井 悠里	名古屋大学・助教	1
A02 公	19H05080 原始惑星系円盤の散逸機構：光蒸発と磁気駆動風の統一理解	令和元年度 ～ 令和2年度	田中 圭	大阪大学・理学系・研究員	1
A02 公	19H05086 原始惑星系円盤における珪酸塩微粒子の新しい衝突付着過程についての実証	令和元年度 ～ 令和2年度	門野 敏彦	産業医科大学・医学部・教授	1
A02 公	19H05087 最新の理論モデルを考慮した低質量星周りの惑星形成の解明と種族合成モデルの生成	令和元年度 ～ 令和2年度	荻原 正博	国立天文台・助教	1
A03 公	19H05072 大気化学・散逸計算によるハビタブル惑星の水量進化の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	黒川 宏之	東京工業大学・研究員	1
B01 公	19H05067 電波および赤外線観測で切り拓く銀河系外縁部の星間化学	令和元年度 ～ 令和2年度	下西 隆	東北大学・助教	1
B01 公	19H05070 ガイアによるガス・ダスト比の3次元計測と星・星団形成との関係	令和元年度 ～ 令和2年度	土橋 一仁	東京学芸大学・教育学部・教授	1

B01 公	19H05074 振動励起状態に着目した星間 有機分子ギ酸メチルのスペク トル線精密計測・解析	令和元年度 ～ 令和2年度	小林 かおり	富山大学・教授	1
B01 公	19H05082 俯瞰で見る大質量原始星円盤：円 盤内奥から電波光球へ	令和元年度 ～ 令和2年度	元木 業人	山口大学・自然科学研究科・ 助教	1
B01 公	19H05083 渦状腕の骨格構造を構成する分子 雲の磁場の研究	令和元年度 ～ 令和2年度	杉谷 光司	名古屋市立大学・教授	1
B01 公	19H05084 非磁化CO <sub>2</sub> 大気地球型惑星/ 金星大気物質循環と中心星の活 動の影響評価	令和元年度 ～ 令和2年度	前澤 裕之	大阪府立大学・理学系・准教 授	1
B02 公	19H05068 微小ダストの磁場整列で解き明か す円盤のミリ波偏波の起源	令和元年度 ～ 令和2年度	田崎 亮	東北大学・理学系・研究員	1
B02 公	19H05069 極めて若い原始星天体に付随した 円盤構造とその進化の観測的研究	令和元年度 ～ 令和2年度	大屋 瑤子	東京大学・理学系・助教	1
B02 公	19H05081 粉体流を用いたダスト集合体の衝 突進化の実験的研究	令和元年度 ～ 令和2年度	中村 昭子	神戸大学・理学系・准教授	1
B02 公	19H05088 偏波観測で探るダストの成長課程	令和元年度 ～ 令和2年度	片岡 章雅	国立天文台・助教	1
B02 公	19H05089 原始惑星系円盤における岩石型惑 星形成領域の高空間分解能観測	令和元年度 ～ 令和2年度	橋本 淳	国立天文台・助教	1
B02 公	19H05090 ALMA望遠鏡を用いたデブリ円 盤におけるガス探査	令和元年度 ～ 令和2年度	樋口 あや	理研・研究員	1
A01 公	21H00041 星団形成における磁気的効果と輻 射フィードバックの相互作用	令和3年度 ～ 令和4年度	細川 隆史	京都大学・理学系・准教授	1
A01 公	21H00045 磁気乱流フィラメントの進化：分 子雲コア形成と星質量を決めるコ ア重力崩壊の初期条件	令和3年度 ～ 令和4年度	古屋 玲	徳島大学・准教授	1
A01 公	21H00046 星周円盤の形成と原始星ジェット の理論研究	令和3年度 ～ 令和4年度	町田 正博	九州大学・理学系・准教授	1

A01 公	21H00050 星間ダストの实在根拠を問う：メ ゾスコピック物理は供給問題をど こまで解明できるか？	令和3年度 ～ 令和4年度	木村 宏	千葉工業大学・研究員	1
A01 公	21H00053 ガイアデータを用いた高速度星の 探索と、ダストで隠された星形成 領域の元素組成の決定	令和3年度 ～ 令和4年度	服部 公平	統計数理研究所・助教	1
A01 公	21H00054 動的非軸対称銀河における太陽系 母星団の破壊過程と兄弟星分布の 理論予測	令和3年度 ～ 令和4年度	馬場 淳一	国立天文台・助教	1
A01 公	21H00055 系外惑星探査対象としてのM型矮 星の化学組成の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	青木 和光	国立天文台・准教授	1
A02 公	21H00033 円柱シアリング箱モデルの開発	令和3年度 ～ 令和4年度	鈴木 建	東京大学・総合文化研究科・ 教授	1
A02 公	21H00042 乱流場中での磁気回転不安定の線 形成と新しい非線形飽和モデル の探索	令和3年度 ～ 令和4年度	佐野 孝好	大阪大学・レーザー・助教	1
A02 公	21H00043 巨大惑星近傍でのガスと固体粒子 の相互作用	令和3年度 ～ 令和4年度	大槻 圭史	神戸大学・理学系・教授	1
A02 公	21H00044 ダスト付着力のサイズ・組成依存 性と衝突過程の実験的研究	令和3年度 ～ 令和4年度	中村 昭子	神戸大学・理学系・准教授	1
A02 公	21H00052 原始惑星系円盤における新しい珪 酸塩微粒子衝突付着過程の実証	令和3年度 ～ 令和4年度	門野 敏彦	産業医科大学・医学部・教授	1
A02 公	21H00056 大規模シミュレーションによる原 始惑星系円盤の大域的構造の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	岩崎 一成	国立天文台・助教	1
A02 公	21H00036 隕石から探る木星型惑星大移動 説：模擬実験による有機物指標の 確立	令和3年度 ～ 令和4年度	癸生川陽子	横浜国立大学・工学系研・准 教授	1
A03 公	21H00034 (廃止) Atmospheric-Magma Ocean Evolution of Terrestrial Planets with Primordial Hydrogen Envelopes	令和3年度 ～ 令和4年度	ラムレス ラムセ ス	東京工業大学・研究員	1

A03 公	21H00039 数値シミュレーションから探る巨大衝突後の惑星大気の長期安定性	令和3年度 ～ 令和4年度	黒崎 健二	神戸大学・理学系・助教	1
B01 公	21H00032 メタノールレーザー高頻度観測による、大質量星形成時の質量降着率の時間変動の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	米倉 覚則	茨城大学・理工学研究科・教授	1
B01 公	21H00037 観測と星間化学モデルで迫る銀河系外縁部の化学的多様性形成史	令和3年度 ～ 令和4年度	下西 隆	新潟大学・准教授	1
B01 公	21H00038 内部回転と振動状態間相互作用を持つ星間分子ギ酸メチルの励起状態解析への挑戦	令和3年度 ～ 令和4年度	小林 かおり	富山大学・自然科学系・教授	1
B01 公	21H00040 電波観測で探る金属量が星間物質の進化に及ぼす影響	令和3年度 ～ 令和4年度	福井 康雄	名古屋大学・理学系・研究員	1
B01 公	21H00049 低金属量環境下における分子ガス雲トレーサーとしての一酸化炭素分子輝線の挙動解明	令和3年度 ～ 令和4年度	徳田 一起	九州大学・理学系・助教	1
B01 公	21H00057 分子輝線観測によるフィラメント幅の普遍性の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	島尻 芳人	国立天文台・准教授	1
B01 公	21H00058 アルマ望遠鏡で探る低金属量星形成のダイナミクス	令和3年度 ～ 令和4年度	田中 圭	東京工業大学・理学院・助教	1
B02 公	21H00047 高感度ミリ波VLBI撮像による星間分子ガス中の超微細空間構造の探求	令和3年度 ～ 令和4年度	今井 裕	鹿児島大学・准教授	1
B02 公	21H00048 星と惑星形成の多様性を繋ぐ基礎研究	令和3年度 ～ 令和4年度	高桑 繁久	鹿児島大学・理学部・教授	1
B02 公	21H00059 ALMA長基線観測と新しい解析手法で探査する周惑星円盤	令和3年度 ～ 令和4年度	橋本 淳	自然科学研究機構・助教	1
B03 公	21H00035 若い恒星まわりの系外惑星探査：新解析手法の確立とトランジット惑星観測	令和3年度 ～ 令和4年度	平野 照幸	東京工業大学・助教	1
公募研究 計 49 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

**交付決定額**

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 30 年度	312,130,000 円	240,100,000 円	72,030,000 円
令和元年度	286,780,000 円	220,600,000 円	66,180,000 円
令和 2 年度	284,310,000 円	218,700,000 円	65,610,000 円
令和 3 年度	296,790,000 円	228,300,000 円	68,490,000 円
令和 4 年度	262,730,000 円	202,100,000 円	60,630,000 円
合計	1,442,740,000 円	1,109,800,000 円	332,940,000 円

## 研究発表

研究項目 A01 : 計画研究 (査読付き欧文論文総数は 186 本)

- \*Misugi, Y., Inutsuka, S.; Arzoumanian, D., 2023, "Evolution of the Angular Momentum of Molecular Cloud Cores Formed from Filament Fragmentation", (2023) ApJ, 943, 76.
- \*Shimoda, Jiro; Inutsuka Shu-ichiro, 2023, "The Effects of Cosmic-Ray Diffusion and Radiative Cooling on the Galactic Wind of the Milky Way", ApJ, 926, 8, 14 pp.
- \*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)
- \*Kumar, M. S.; Palmeirim, P.; Arzoumanian, D.; Inutsuka, S.I., 2020, "Unifying low- and high-mass star formation through density-amplified hubs of filaments. The highest mass stars (>100M\_sun) form only in hubs", A&A, 642, A87, 21 pp.
- 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
- \*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.
- \*Hennebelle, P., Inutsuka, S., 2019, "The role of magnetic field in molecular cloud formation and evolution", Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 6, 5.
- \*Stamer, T., Inutsuka, S., 2018, "Radiation-hydrodynamic Simulations of Spherical Protostellar Collapse for Very Low-mass Objects", The Astrophysical Journal, 869, 179.
- \*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.
- \*Arzoumanian, D., Shimajiri, Y., Inutsuka, S., Inoue, T., Tachihara, K., 2018, "Molecular filament formation and filament-cloud interaction: Hints from Nobeyama 45 m telescope observations", Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 96.
- \*Stamatellos, D., Inutsuka, S., 2018, "The diverse lives of massive protoplanets in self-gravitating discs", MNRAS, 477, 3110.
- \*Stamer, T., Inutsuka, S., 2018, "A Fast and Accurate Method of Radiation Hydrodynamics Calculation in Spherical Symmetry", The Astronomical Journal, 155, 253.
- \*Inoue, T., Hennebelle, P., Fukui, Y., Matsumoto, T., Iwasaki, K., Inutsuka, S., 2018, "The formation of massive molecular filaments and massive stars triggered by a magnetohydrodynamic shock wave", PASJ, 70, S53.
- \*Kobayashi, M. I. N., Kobayashi, H., Inutsuka, S., Fukui, Y., 2018, "Star formation induced by cloud-cloud collisions and galactic giant molecular cloud evolution", Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, S59.
- \*Tominaga, R. T., Inutsuka, S., Takahashi, S. Z., 2018, "Non-linear development of secular gravitational instability in protoplanetary disks", Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 3.
- \*Chan, H. Y. J., Chiba, M., Ishiyama, T. 2019, "Void formation: does the void-in-cloud process matter?", MNRAS, 490, 2405
- \*Carollo, D., Chiba, M., et al. 2019, "Evidence for the Third Stellar Population in the Milky Way's Disk", ApJ, 887, 22
- \*Niikura, H., Takada, M., ... Chiba, M. (全 11 名) 2019, "Microlensing constraints on primordial black holes with Subaru/HSC Andromeda observations", Nature Astronomy, 3, 524-534

(主催した国際シンポジウム)

“Protostars and Planets VII” (組織委員会代表: 犬塚修一郎) 2023 年 4 月 10 日~15 日, 京都 (参加者 780 名)

“Interstellar Filament Paradigm” (組織委員会代表: 犬塚修一郎) 2018 年 11 月 5 日~9 日, 名古屋 (参加者 101 名)

“EANAM9” (組織委員会代表: 犬塚修一郎) 2022 年 9 月 26 日~30 日, 沖縄, 日本 (参加者 102 名)

公募研究 A01(主な査読付き雑誌論文)

- \*Fujimoto, Y., Inutsuka, S., Baba, J., "Efficient radial migration by giant molecular clouds in the first several hundred Myr after the stellar birth", (2023) MNRAS, 523, 3049

研究項目 B01: 計画研究 B01 (査読付き欧文論文総数は 134 本)

- \*Tokuda, K., Minami, T.,..., Tachihara, K. (19 番目), Kawamura, A., & Onishi, T., 2022 (21 番目; 全 21 名), "An ALMA Study of the Massive Molecular Clump N159W-North in the Large Magellanic Cloud: A Possible Gas Flow Penetrating One of the Most

- Massive Protocluster Systems in the Local Group", ApJ, 933, 20
- \*Kobayashi, M. I. N., Inoue, T., Tomida, K., Iwasaki, K., & Nakatsugawa, H., 2022, "Nature of Supersonic Turbulence and Density Distribution Function in the Multiphase Interstellar Medium", ApJ, 930, 76
  - \*Tokuda, K., Kondo, H., ..., Muraoka, K. (14 番目), Kawamura, A., Tachihara, K.(16 番目), Fukui, Y., & Onishi, T. (18 番目; 全 18 名), 2021, "An Unbiased CO Survey toward the Northern Region of the Small Magellanic Cloud with the Atacama Compact Array. I. Overview: CO Cloud Distributions", ApJ, 922, 171
  - \*Masui, S., Yamasaki, Y., Ogawa, H., ..., Gonzalez, A. (23 番目), Uzawa, Y., & Onishi, T. (25 番目; 全 25 名), 2021, "Development of a new wideband heterodyne receiver system for the Osaka 1.85 m mm-submm telescope: Receiver development and the first light of simultaneous observations in 230 GHz and 345 GHz bands with an SIS-mixer with 4-21 GHz IF output", PASJ, 73, 1100-1115
  - \*Yamasaki, Y., Masui, S., Ogawa, H., ..., Gonzalez, A.(22 番目), Uzawa, Y., & Onishi, T. (24 番目; 全 24 名), 2021, "Development of a new wideband heterodyne receiver system for the Osaka 1.85 m mm-submm telescope: Corrugated horn and optics covering the 210-375 GHz band", PASJ, 73, 1116-1127
  - \*Neelamkodan, N., Tokuda, K., Barman, S., Kondo, H., Sano, H., & Onishi, T., 2021, "ALMA Reveals a Cloud-Cloud Collision that Triggers Star Formation in the Small Magellanic Cloud", ApJ, 908, L43
  - \*Muraoka, K., Kondo, H., T., ..., Onishi, T. (12 番目), Saigo, K., Tachihara, K. (14 番目), ... (全 16 名), 2020, "ALMA Observations of Giant Molecular Clouds in M33. II. Triggered High-mass Star Formation by Multiple Gas Colliding Events at the NGC 604 Complex", ApJ, 903, 94
  - \*Fujishiro, K., Tokuda, K., Tachihara, K., ..., T., Tomida, K. (9 番目), ..., Onishi, T. (14 番目; 全 14 名), 2020, "A Low-velocity Bipolar Outflow from a Deeply Embedded Object in Taurus Revealed by the Atacama Compact Array", ApJ, 899, L10
  - \*Tokuda, K., ..., Tachihara, K. (5 番目), Tsuge, K., Inoue, T. (7 番目), ..., Onishi, T. (22 番目; 全 22 名), 2019, "An ALMA View of Molecular Filaments in the Large Magellanic Cloud. II. An Early Stage of High-mass Star Formation Embedded at Colliding Clouds in N159W-South", ApJ, 886, 15
  - \*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
  - \*Tokuda, K., Onishi, T., ..., Inoue, T. (5 番目), ..., Tomida, K. (9 番目), ..., Tachihara, K. (12 番目; 全 12 名), 2018, "Warm CO Gas Generated by Possible Turbulent Shocks in a Low-mass Star-forming Dense Core in Taurus", ApJ, 862, 8, (招待講演)
  - "Influences of Shock Propagation on Molecular Cloud Dynamics", Tsuyoshi Inoue, European Week of Astronomy & Space Science (Jun 24-28, 2019), Lyon, France
  - "Formation and Early Evolution of Protoplanetary Disks", K. Tomida, Workshop on Star Formation (May 20-24, 2019), International Space Science Institute, Bern, Switzerland
  - "TAO/MIMIZUKU", Miyata, T., The Next Generation of Thermal-IR Astronomy: How can we Reach the Noise Limit? (Nov 12-16, 2018), Leiden, Netherlands
  - "Physical properties and evolution of GMCs in the Galaxy and the Magellanic Clouds", T. Onishi, The Cosmic Cycle of Dust and Gas in the Galaxy: From Old to Young Stars (Jul. 9-13, 2018), Quy Nhon, Vietnam (プレスリリース)
  - 大マゼラン雲における大質量星形成をとらえたー アルマの見た「2羽の孔雀」分子雲が物語る2億年の宇宙史 (名古屋大学/大阪府立大学/国立天文台の合同発表), 2019年11月14日
  - 星の卵の「国勢調査」ーアルマ望遠鏡が追う星のヒナ誕生までの10万年 (大阪府立大学/名古屋大学/国立天文台の合同発表)
  - 世界初! 宇宙空間の多くの分子からの電波を同時に受信するシステムの開発に成功 : ー宇宙の進化や星・惑星が形成されるメカニズムの解明に向けてー (大阪府立大学/国立天文台の合同発表), 2021年7月8日 (テレビ出演)
  - コズミック フロント☆NEXT「スター誕生 宇宙に輝く奇跡の瞬間」 2020年4月02日(木) 午後10時00分~10時59分 (BSプレミアム&BS-4K) : 井上剛志, 徳田一起, 他  
公募研究 B01
  - \*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
  - \*Fukui, Y., Sano, H., et al. 2021, "Pursuing the Origin of the Gamma Rays in RX J1713.7-3946 Quantifying the Hadronic and

研究項目 A02 : 計画研究 (査読付き欧文論文総数は 147 本)

- \*Arakawa, S., & Kokubo, E., 2023, “Number of stars in the Sun's birth cluster revisited”, A&A, 670, A105
- \*Hoshino, H. & Kokubo, E., 2023, “Orbital structure of planetary systems formed by giant impacts: stellar mass dependence”, MNRAS, 519, 2838
- \*Takahashi, S. Z., Kokubo, E., Inutsuka, S., 2023, “Planetesimal Formation by the Gravitational Instability of Dust Ring Structures”, ApJ, 945, id.120
- \*Tanaka, H., Anayama, R., Tazaki, R., 2023, “Compression of Dust Aggregates via Sequential Collisions with High Mass Ratios”, ApJ, 945, id.68
- \*Ogihara, M., Kokubo, E., Nakano, R., Suzuki, T. K., 2022, “Rapid-then-slow migration reproduces mass distribution of TRAPPIST-1 system”, A&A, 658, id.A184
- \*Okuzumi, S., Ueda, T., & Turner, N. J., 2022, “A global two-layer radiative transfer model for axisymmetric, shadowed protoplanetary disks”, PASJ, 74, 82
- \*Ida, S., Guillot, T., Hyodo, R., Okuzumi, S., Youdin, A. N., 2021, “Planetesimal formation around the snow line. I. Monte Carlo simulations of silicate dust pile-up in a turbulent disk”, A&A, 646, id.A13
- \*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
- \*Ueda, T., Ogihara, M., Kokubo, E., Okuzumi, S., 2021, “Early Initiation of Inner Solar System Formation at the Dead-zone Inner Edge”, ApJL, 921, id.L5
- \*Ida, S., Ueta, S., Sasaki, T., Ishizawa, Y., 2020, “Uranian Satellite Formation by Evolution of a Water Vapor Disk Generated by a Giant Impact”, Nature Astronomy
- \*Marzari, F., & Nagasawa, M., 2020, “Secular evolution of close-in planets: the effects of general relativity”, MNRAS, 493, 427
- \*Tanaka, H., Murase, K., & Tanigawa, T., 2020, “Final Masses of Giant Planets. III. Effect of Photoevaporation and a New Planetary Migration Model”, ApJ, 891, 143
- \*Homma, K. A., Okuzumi, S., Nakamoto, T., & Ueda, Y., 2019, “Rocky Planetesimal Formation Aided by Organics”, ApJ, 877, 128
- \*Hyodo, R., Ida, S., & Charnoz, S., 2019, “Formation of rocky and icy planetesimals inside and outside the snow line: effects of diffusion, sublimation, and back-reaction”, A&A, 629, A90
- \*Ida, S., Yamamura, T., & Okuzumi, S., 2019, “Water delivery by pebble accretion to rocky planets in habitable zones in evolving disks”, A&A, 624, A28
- \*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
- \*Nagasawa, M., et al., 2019, “Shock-generating Planetesimals Perturbed by a Giant Planet in a Gas Disk”, ApJ, 871, 110
- \*Okuzumi, S., Mori, S., & Inutsuka, S., 2019, “The Generalized Nonlinear Ohm's Law: How a Strong Electric Field Influences Nonideal MHD Effects in Dusty Protoplanetary Disks”, ApJ, 878, 133
- \*Ida, S., Tanaka, H., Johansen, A., Kanagawa, K. D., & Tanigawa, T., 2018, “Slowing Down Type II Migration of Gas Giants to Match Observational Data”, ApJ, 864, 77
- \*Kobayashi, H., & Tanaka, H., 2018, “From Planetesimal to Planet in Turbulent Disks. II. Formation of Gas Giant Planets”, ApJ, 862, 127
- \*Ogihara, M., Kokubo, E., Suzuki, T. K., & Morbidelli, A., 2018, “Formation of close-in super-Earths in evolving protoplanetary disks due to disk winds”, A&A, 615, A63,
- ハビタブルな宇宙: 系外惑星が示す生命像の変容と転換 井田茂 春秋社 (2019年11月) 頁数: 242

公募研究 A02 (主な査読付き雑誌論文)

- \*M. Arakawa, T. Saiki, K. Wada, K. Ogawa, T. Kadono et al., (合計 68 人) 2020, “An Artificial Impact on the Asteroid 162173 Ryugu Formed a Crater in the Gravity-Dominated Regime” Science 368, 67
- \*Brasser, R., Mojzsis S.J., 2020, “The partitioning of the inner and outer Solar System by a structured protoplanetary disk”,

Nature Astronomy 4, 492

- \*Fujii, Y.I., Ogihara M., 2020 “Formation of Single-Moon Systems around Gas Giants”, A&A, 635, L4
- \*Nagaashi, Y., Nakamura, A., 2023, “High mobility of asteroid particles revealed by measured cohesive force of meteorite fragments”, Science Advances 9, eadd3530

研究項目 B02: 計画研究 B02 (査読付き欧文論文総数は 165 本)

- \*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.
- \*Yasui, C., Kobayashi, N., Saito, M., Izumi, N., & Ikeda, Y., 2023, Mass Function of a Young Cluster in a Low-metallicity Environment. Sh 2-209, Astrophys. J., 943, id.137, 26 pp.
- \*Yoshida, T. C., Nomura, H., Tsukagoshi, T., Furuya, K., & Ueda, T., 2022, Discovery of Line Pressure Broadening and Direct Constraint on Gas Surface Density in a Protoplanetary Disk, Astrophys. J., 937, id.L14, 9 pp.
- \*Notsu, S., Ohno, K., Ueda, T., Walsh, C., Eistrup, C., & Nomura, H., 2022, The Molecular Composition of Shadowed Protoplanetary Disk Midplanes Beyond the Water Snowline, Astrophys. J., 936, id.188, 39 pp.
- \*Izumi, N., Kobayashi, N., Yasui, C., Saito, M., Hamano, S., & Koch, P. M., 2022, Star Formation Activity beyond the Outer Arm. II. Distribution and Properties of Star Formation, Astrophys. J., 936, id.181, 29 pp.
- \*Honda, M., Tazaki, R., Murakawa, K., Terada, H., Kudo, T., Hattori, T., Hashimoto, J., Tamura, M., & Watanabe, M., 2022, Subaru/IRCS L-band spectro-polarimetry of the HD 142527 disk scattered light, PASJ, 74, pp. 851-856.
- \*Tsukagoshi, T., Nomura, H., Muto, T., ... (全 13 名), 2022, ALMA High-resolution Multiband Analysis for the Protoplanetary Disk around TW Hya, Astrophys. J., 928, id.49, 16 pp.
- \*Tazaki, R., Murakawa, K., Muto, T., Honda, M., & Inoue, A. K., 2021, The Water-ice Feature in Near-infrared Disk-scattered Light around HD 142527: Micron-sized Icy Grains Lifted up to the Disk Surface? Astrophys. J., 921, id.173, 15 pp.
- \*Nomura, H., Tsukagoshi, T., Kawabe, R., Muto, T., ... (全 12 名), 2021, High Spatial Resolution Observations of Molecular Lines toward the Protoplanetary Disk around TW Hya with ALMA, Astrophys. J., 914, id.113, 10 pp.
- \*Soon, K.-L., Momose, M., Muto, T., Tsukagoshi, T., Kataoka, A., Hanawa, T., Fukagawa, M., Saigo, K., & Shibai, H., 2019, Investigating the gas-to-dust ratio in the protoplanetary disk of HD 142527, PASJ, 71, id.124, 32 pp.
- \*Yasui, C., Hamano, S., Fukue, K., ..., (全 15 名), 2019, Possible Progression of Mass-flow Processes around Young Intermediate-mass Stars Based on High-resolution Near-infrared Spectroscopy. I. Taurus, Astrophys. J., 886, id.115, 20 pp.
- \*Tsukagoshi, T., Muto, T., Nomura, H., ... (全 13 名), 2019, Discovery of An au-scale Excess in Millimeter Emission from the Protoplanetary Disk around TW Hya, Astrophys. J., 878, id.L8, 6 pp.
- \*Notsu, S., ..., Nomura, H., ..., Honda, M., ... (全 9 名), 2019, Dust Continuum Emission and the Upper Limit Fluxes of Submillimeter Water Lines of the Protoplanetary Disk around HD 163296 Observed by ALMA, Astrophys. J., 875, id.96, 11 pp. (主催したシンポジウム)
- 新学術「惑星形成」オンライン研究会 2021 『低金属量環境下における星・惑星形成』 (2021 年 12 月 8 日-10 日開催)  
(プレスリリース)  
(野村・塚越) 2023 年 1 月 11 日 年を経た惑星工場にも十分な材料  
(野村・塚越) 2022 年 8 月 12 日 惑星系の起源と進化を解き明かす新たな「指紋」～アルマ望遠鏡がとらえた惑星誕生現場の物質組成の大きな変化～  
(アウトリーチ)  
(野村) 2021 年度 朝日カルチャーセンター講座「惑星系の物質の起源」  
(野村) 2019 年度 おおた区東京工業大学提携講座「アルマ望遠鏡で探る惑星形成の現場」

公募研究 B02 (主な査読付き雑誌論文)

- \*Hashimoto, J., Liu, H. B., Dong, R., Liu, B., Muto, T., 2023, “Grain Growth in the Dust Ring with a Crescent around the Very Low-mass Star ZZ Tau IRS with JVL” Astrophys. J., 941, id.66.

研究項目 A03: 計画研究 (査読付き欧文論文総数は 226 本)

- \*Kimura, T. & Ikoma, M., 2022, Predicted diversity in water content of terrestrial exoplanets orbiting M dwarfs, Nature Astronomy, 6, 1296-1307.
- \*Nakayama, A., Ikoma, M., & Terada, N., 2022, Survival of terrestrial N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> atmospheres in violent XUV environments through efficient atomic line radiative cooling, Astrophys. J., 937, id.72, 18 pp.

- \*Kawachi, K., Murgas, F., Palle, E., Narita, N., Fukui, A., ..., Hori, Y., Ikoma, M., ... (全 54 名), 2022, Validation and atmospheric exploration of the sub-Neptune TOI-2136b around a nearby M3 dwarf, *Astron. Astrophys.*, 666, id.A4, 19pp.
- \*Yoshida, T., Terada, N., Ikoma, M., & Kuramoto, K., 2022, Less effective hydrodynamic escape of H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O atmospheres on terrestrial planets orbiting pre-main-sequence M dwarfs, *Astrophys. J.*, 934, id.137, 11 pp.
- \*Changeat, Q., Edwards, B., Al-Refaie, A. F., ..., Ikoma, M., ..., Tinetti, G. (全 14 名), 2022, Five key exoplanet questions answered via the analysis of 25 hot-Jupiter atmospheres in eclipse, *Astrophys. J. Supp.*, 260, id.3., 49 pp.
- \*Fukui, A., Kimura, T., Hirano, T., Narita, N., Kodama, T., Hori, Y., Ikoma, M., ... (全 63 名), 2022, TOI-2285b: A 1.7 Earth-radius planet near the habitable zone around a nearby M dwarf, *PASJ*, 74, L1-L8
- \*Fukui, A., Korth, J., Livingston, J. H., ..., Narita, N., ... (全 69 名), 2021, TOI-1749: An M dwarf with a trio of planets including a near-resonant pair, *Astron. J.*, 162, id. 167, 23 pp.
- \*Hirano, T., Livingston, J. H., Fukui, A., Narita, N., ..., Hori, Y., ..., Ikoma, M., ... (全 63 名), 2021, Two bright M dwarfs hosting ultra-short-period super-Earths with Earth-like compositions, *Astron. J.*, 162, id.161, 23 pp.
- \*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
- \*Narita, N., Fukui, A., ..., Ikoma, M., ... (全 36 名), 2020, MuSCAT3: A 4-color simultaneous camera for the 2m Faulkes Telescope North, *Proceedings of SPIE*, 11447, id.114475K, 7pp.

研究項目 B03: 計画研究 (査読付き欧文論文総数は 242 本)

- \*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.
- \*Delrez, Y., ...Kotani, T., ...Tamura, M., ... (全 85 名), 2022, Two temperate super-Earths transiting a nearby late-type M dwarf, *Astron.*, & *Astrophys.*, 667, id.A59, 31 pp.
- \*Harakawa, T., ...Kotani, T., ...Tamura, M., Sato, B. (全 49 名), 2023, A super-Earth orbiting near the inner edge of the habitable zone around the M4.5 dwarf Ross 508, *PASJ*, 74, pp.904-922.
- \*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.
- \*Nugroho, S., ...Kotani, T., ...Tamura, M., ... (全 26 名), 2021, First Detection of Hydroxyl Radical Emission from an Exoplanet Atmosphere: High-dispersion Characterization of WASP-33b Using Subaru/IRD, *Astrophys. J. Letters*, 910, Issue 1, id.L9, 9 pp.
- \*Hirano, T., ...Kotani, T., ...Tamura, M., ... (全 23 名), 2020, Limits on the Spin-Orbit Angle and Atmospheric Escape for the 22 Myr Old Planet AU Mic b, *Astrophys. J. Letters*, 899, Issue 1, id.L13.
- \*Hirano, T., ...Kotani, T., ...Tamura, M., ... (全 24 名), 2020, Evidence for Spin-Orbit Alignment in the TRAPPIST-1 System, *Astrophys. J. Letters*, 890, L27.
- \*Currie, T., ...Tamura, M., ... (全 33 名), 2019, No Clear, Direct Evidence for Multiple Protoplanets Orbiting LkCa 15: LkCa 15 bcd are Likely Inner Disk Signals, *Astrophys. J. Letters*, 877, L3.
- \*Tamura, M., 2019, *Extrasolar Planetary Systems*, In *Astrobiology*, ISBN 978-981-13-3638-6. Springer Nature.
- \*Livingston, J. H., ...Tamura, M., ... (全 34 名), 2018, 44 Validated Planets from K2 Campaign 10, *Astron. J.*, 156, id. 78 (主催した国際シンポジウム)

“In the Spirit of Lyot 2019” (SOC Chair : 田村元秀) 2019 年 10 月 21 日～25 日, 東京, 日本 (参加者 200 名)

公募研究 B03 (主な査読付き雑誌論文)

- \*Hirano, T., ...Kotani, T., ...Tamura, M., Sato, B. (全 49 名), 2023, An Earth-sized Planet around an M5 Dwarf Star at 22 pc, *Astron. J.*, 165, id.131, 14 pp.

## 研究成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

本新学術領域には、3つのテーマについて6つの研究項目「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)」がある。それぞれについて、以下に述べる。

研究項目 A01 では、太陽系近傍の分子雲と原始星の形成過程の詳細な理解を応用して、銀河系全体の進化についての研究を大いに発展させた。まず、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る。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。(a) 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。(b) 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。(c) 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。計画研究でカバーできない星間化学や磁場、大質量原始星円盤などに関しては、公募研究により対応できている。

研究項目 A02 では、(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。詳細は(2)にまとめる。

研究項目 B02 では、系外惑星の多様性の起源に及ぼす影響を解明するため、円盤構造を探る対象天体を拡張し、以下の3点を具体的な達成目標とした。(A) 多様な惑星形成モードの解明、(B) 水の振る舞い、(C) 幅広い環境下での惑星形成。(C)に関連して、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した。提案段階では、領域期間内にせいめい望遠鏡新装置により『100 個以上の円盤を含む星団を 10 個以上の観測を行う』目標を掲げていたが、新型感染症拡大の影響により、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 CO<sub>2</sub> 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。これらの観測および開発により、領域設定期間内に惑星の多様性の起源が形成か進化かを明らかにする計画である。さらに地球近傍の赤色矮星の観測により、太陽系とは異なる環境下でのアストロバイオロジーを推進することを目標とした。

今評価時までとなる 2022 年度までには、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。

## (2) 本研究領域により得られた成果について

研究項目 A01 計画研究 A01 : ハーシェル宇宙望遠鏡による 3 万個以上の分子雲の観測データから、銀河系内のほぼすべて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示した(Kumar+2020)。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・パラダイムに現れるバブルの衝突で説明可能可能であり(Kumar+2022)、期待される特徴的な「風車」磁場構造も発見した(Hwang+2022)。このパラダイムは最近 JWST が発見した系外円盤銀河のバブル構造と星形成をも記述することが示唆される。90 億年にわたる期間にわたる銀河系の星形成活動を可能にする銀河ハローと円盤の相互作用の重要性を見抜き、銀河円盤から吹き出る銀河風加速メカニズムを解明して、ハローを重元素で十分に汚染することを示した(Shimoda & Inutsuka 2022, 2023)。形成された星は銀河系の動径方向に移動することが Gaia のデータと分光観測データを組み合わせて示し(千葉ら)、さらに、理論シミュレーションによっても示した(Fujimoto+2023, Baba+2023)。超高圧の銀河中心領域領域の星形成についても解明した(Lu+2021, Inutsuka 2021)。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(Misugi+2019, 2021)。原始惑星系円盤の形成過程について解明した(Tsukamoto+2021ab, 2023)。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、数値天文学のコミュニティ全体に貢献することができた(Matsumoto 及び Tsukamoto ら)。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(寿命百万年程度の放射性同位体) $^{60}\text{Fe}$  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(Fujimoto+2020a)。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。

公募研究 A01: 超新星残骸に付随する星間分子雲観測(佐野)、氷微粒子付着成長臨界衝突速度調査(木村)、磁場を考慮した分子雲衝突シミュレーション(細川)、オリオン座分子雲フィラメント波長 450/850  $\mu\text{m}$  偏波観測(古屋)、数値シミュレーションによる原始星ジェット駆動条件の解明(町田)、Gaia 衛星・すばる望遠鏡のデータを用いた化学組成が特異な星を探索・発見(服部)、天の川銀河の中での太陽系誕生位置や軌道移動過程も解明(馬場)、M 型矮星の化学組成や有効温度を決定(青木)など成果を得た。

研究項目 B01 計画研究 B01 : (a) 1.85m 望遠鏡は、230GHz、345GHz 帯の超伝導受信機、及びその周波数帯域をカバーしたホーンを用いて中間周波数(IF)帯で 4-21GHz(当初予定より 3GHz 広い)をカバーする受信機システムを構築し、それぞれの周波数帯で 12CO、13CO、C18O の合計 6 スペクトルの同時観測可能なシステムの実験室実験に成功した (Masui et al. 2021, Yamasaki et al. 2021)。広い周波数帯にわたる性能の均一化を進め、令和 2 年度には望遠鏡に搭載し、天体からの広帯域受信に成功した。また、望遠鏡のオーバーホール、リモート観測システムの刷新を行い、現在設置されている野辺山宇宙電波観測所での完全なリモート観測を実現している。(b) MIMIZUKU の現状については以下である。オートガイダー・シャックハルトマンセンサーに関しては、V-band から I-band 化に伴い光学系を再設計し、仕様を満たすシステム設計が完了した。なお、TAO 望遠鏡に関しては、望遠鏡本体は令和 2 年度中に完成予定、サイト・インフラ整備に関しては、2020/01 から基礎工事を開始している。(c) 上記の研究・開発と平行して、様々な望遠鏡を用いた分子雲における星形成研究や、関連する理論研究を推進し

ている。観測研究においては、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、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。重元素量によらず、大規模星形成が分子雲同士の相互作用により引き起こされていることを明らかにした。また、重元素量が銀河系の 1/5 である小マゼラン雲において、原始星からの分子ガスアウトフローを初めて検出し、このような低元素量下においても、銀河系同様に、惑星系形成に繋がるディスク形成が見られることが明らかになった。さらに、小質量星形成直前の分子雲の観測については、計画研究 A01 との共同研究で成果が出ている。また、理論研究においては、上記の多くの観測論文に理論的裏付けを与えるべく参加しており、また、星間ガスの相互作用等を通じた様々な構造形成の研究も推進している。

公募研究 B01: 星間物質や星形成の多様性を様々な手法で明らかにする事を目標としており、ホットコア観測(下西)、有機星間分子観測(小林)、近赤外中分散分光計改良(前澤)、分子雲でのダスト成長(土橋)、大質量原始星の空間分解撮像(元木)、フィラメント近赤外偏光観測(杉谷)に関して進展があった。

研究項目 A02 計画研究 A02: (i)微惑星形成の素過程、(ii)惑星形成の素過程の研究、(iii)汎惑星形成理論と太陽系の起源、において、新しい微惑星形成モデル、惑星移動モデルを含む、多数の成果が得られた。以下に各項目の主な成果を紹介する。(i-a)ダストの成長・移動モデルの構築: 氷マントル構造のペブルを考え、雪線で非結晶シリケート粒子が放出されるとして、円盤内側の 1000 K 以上の領域に達して結晶化したシリケート粒子の外側への拡散を計算し、ペブル流減衰期には結晶/非結晶が彗星での観測値を説明できるくらいになることを示した(Okamoto & Ida 2022)。(i-b)ダストの衝突合体・破壊とペブル生成モデルの構築: 最近の円盤偏光観測よりダストは密な構造をもつことが明らかになったが、これは従来のダスト衝突の数値計算では説明不可能であった。質量比のついたダスト連続衝突の数値計算を行い、密な構造のダスト生成に成功した(Tanaka et al. 2023)。(i-c)雪線内側におけるダスト濃集と重力不安定による岩石微惑星形成のモデル構築: 有機物に覆われた岩石ダストの付着合体を調べ、特定の温度範囲では壊れずに合体成長し、微惑星まで成長可能であることを発見した(Homma et al. 2019)。ペブルが氷マントル構造を持つ場合、ガス抵抗で雪線の内側に移動すると小さい岩石粒子群が放出され、これらへのガス抵抗は弱く動径移動速度が小さいので、雪線のすぐ内側に堆積して、岩石微惑星が形成される可能性を指摘した(Ida et al. 2021)。(i-d)ダスト、微惑星、ペブルの統合モデルと円盤観測との比較: CO<sub>2</sub> 氷の低い付着力を考慮したモデルによって、ALMA による円盤のダスト熱放射の偏光観測の再現に成功した(Okuzumi & Tazaki 2019)。(ii-a)微惑星の衝突・破壊過程: 衝突破片が小質量でも長時間かけて、惑星の軌道進化に影響を与えることを示した(Kobayashi et al. 2019)。系統的な数値衝突実験によって、微惑星の合体条件を微惑星パラメータと衝突パラメータの関数として定式化した(Shibata et al. 2021)。(ii-b)微惑星の局所集積: 成長する木星からの重力摂動を考慮して、木星内側の微惑星の軌道進化を調べ、数 10 km 程度の大きさであれば、軌道移動は小さく微惑星は局所的な範囲に留まり、また衝突速度もあまり増大することがないため、局所集積が可能と判明した(Nagasawa et al. 2019)。(ii-c)材料物質の移動を考慮した集積: 惑星から重力摂動を受けるガス円盤の流体シミュレーションとそのガス流の中での小石の軌道計算を行い、小石サイズ天体の惑星への集積率を詳細に調べた(Okamura & Kobayashi 2021)。TRAPPIST-1 系の質量分布が、原始惑星が急速な移動を経験して円盤内縁付近に閉じ込められ、その後、より質量の大きい原始惑星がゆっくりと移動することで再現されることを発見した。この移動遷移は、円盤風を持つ円盤進化モデルで自然に実現する(Ogihara et al. 2022)。(ii-d)ガス惑星の形成: 数値流体計算に基づいてガス惑星の新たな形成モデルを提唱した(Tanaka et al. 2020)。ガス惑星は普遍的な進化経路をたどることを発見し、同時に従来問題であった巨大惑星の落下問題を解決した。(ii-e)近接スーパーアース系の形成: 巨大衝突によって形成される近接スーパーアース系の軌道構造の中心星質量依存性を多体シミュレーションで調べ、軌道構造のスケーリング則を明らかにした(Hoshino & Kokubo 2023)。(iii)汎惑星形成理論と太陽系の起源: 原始惑星系円盤の中での小石サイズの天体形成、さらに微惑星、惑星への成長過程を統計的シミュレーションにより調べた。その結果、これまでの研究で理論的に困難だった巨大ガス惑星が数十万年で形成可能であることを示した(Kobayashi & Tanaka 2021)。原始惑星系円盤の高温領域に存在するデッドゾーンの境界において、微惑星形成とその後の微惑星集積を計算し、太陽系地球型惑星に類似する軌道・質量分布を持つ岩石惑星が生まれる円盤条件を明らかにした(Ueda et al. 2021)。

公募研究 A02: 原始惑星系円盤の磁気不安定性調査(藤井・佐野)やシミュレーション(鈴木・岩崎)、円盤光蒸発(田中)、地球型惑星形成後期過程(荻原・ブラザー)、衛星・環系(大槻)の理論研究は、相補的に

共同研究した。ダスト衝突室内実験(門野・中村)や隕石化学分析(癸生川)は本計画理論構築に役立った。

研究項目 B02 計画研究 B02:(A)の多様な惑星形成モードの解明に関しては、ALMA による高解像度観測を通じて、円盤内の不安定で作られたとみられる非軸対称なダスト濃集領域に大型ダストが集積しており、微惑星形成の有力サイトであることが確認された。一方で、最近傍の原始惑星系円盤である TW Hya では、惑星に伴う可能性があるダストクランプを過去最高の解像度での撮像で発見したほか、CO ガスが示す圧力広がりにより水素ガスを定量する世界初の手法の開拓に成功し、進化後期段階で顕著な非軸対称性を示さない円盤でも惑星形成に十分な円盤ガスが存在することを確実にした。これら研究の過程で、スパースモデリングによる新イメージング手法の開発も進めた。(B)の水の振る舞いに関して、Subaru/IRCS L-band 偏光モードによる星周環境における水氷の観測を行った結果、円盤散乱光の L-band 低分散スペクトルを初めて取得し、偏光スペクトルから氷の存在量が標準モデルよりも円盤表層で低下している可能性が示唆された。さらに、将来のスペース赤外線天文衛星においてスノーラインレーザーとなりうる水蒸気輝線の観測の検討を行い、成果を取りまとめた。水以外のスノーラインについても、ALMA ラージプログラム観測に基づく解析を進め、円盤ガス中の C/O 比に著しい増加があることを確認した。(C)の幅広い環境下での惑星形成においては、銀河系内で最も金属量の低い星団において中間赤外線でトレースされる円盤の統計を明らかにしたほか、光蒸発による円盤からのガス散逸率が金属量に応じて変化すること、特に低金属量の場合に X 線照射によりガス散逸率が増加することを示した。これらに関連し、低金属量環境下での円盤寿命や誕生する星の初期質量関数を探るジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST) GTO プログラムも実施中である。また、せいめい望遠鏡に搭載する近赤外線偏光撮像装置では、天体用途で初めて使用する国産の赤外線イメージセンサーを無事に稼働させることに成功し、ファーストイメージを取得した。研究期間終了までに十分な試験観測を実施し、初期科学成果のベースとなるデータを取得する予定である。

公募研究 B02: TW Hya 円盤におけるダスト連続波のエネルギースペクトル分布を詳しく調べた結果、ダスト散乱を考慮するとダスト柱密度の見積りが約 25 倍高くなることを指摘した。デブリ円盤のガス成分を ALMA 観測で検出するとともに、さまざまなデータベースを用いた統計的研究を進めた。また、連星系や主系列星に満たない質量を持つ星に付随する円盤の ALMA 観測を進め、惑星形成の多様性を広範に調べた。星間ガス雲微細構造の検出に向けて 3mm 帯 VLBI 観測システムを野辺山 45m 鏡に構築し、同システムを完成させ科学運用(単一鏡観測)を果たした。新しいデータ解析手法を用いて、ALMA アーカイブデータ約 100 天体に周惑星円盤探査を行ったが、新規の周惑星円盤は検出されなかった。

研究項目 A03 計画研究 A03:以下に代表的な観測的科学成果と開発的成果を挙げる。ただし、B03 班と重複する成果は B03 班の成果として記載してある。(a) 赤色矮星のまわりに地球のような海惑星の存在を予測(Kimura & Ikoma 2022, Nature Astronomy)。原始惑星系円盤中で形成される岩石惑星が獲得する水素大気と、その大気の毛布効果で生じるマグマオーシャンとの化学反応で、水が生成されるという独自のアイデアを、独自に開発した惑星種族合成モデルに組み込み M 型星まわりのハビタブルゾーンに(従来の予測とは対照的に)地球のような水惑星が形成されることを示した。(b) 地球型の大気は強力な紫外線照射でも散逸しないことを発見(Nakayama, Ikoma, & Terada 2022)。地球や火星の大気モデルを用いると M 型星のハビタブルゾーンのような強い紫外線環境では、大気はブローオフ状態に入り、熱的に散逸してしまうことが知られていた。しかし、原子線冷却を含む放射過程を詳細に検討した結果、従来の予測とは対照的に、ブローオフ状態が発生しないことが示された。(c) 「1 年」の長さが 1 日に満たない地球型惑星を低温度星のまわりで発見(Hirano et al. 2021)。MuSCAT シリーズと IRD インテンシブ観測により赤色矮星の周りで 2 つの超短周期惑星 TOI-1634b と TOI-1685b を発見した。TOI-1685b は JWST cycle 2 の観測ターゲットにも選ばれ、注目されている。(d) 大気の詳細調査に適した地球型の系外惑星を発見(Trifonov et al. 2021)。太陽系から 26 光年の距離にある赤色矮星 Gliese 486 の周りに大気の観測に適した高温の地球型惑星を発見した。(e) 超高温・超短周期の海王星型惑星を発見(Jenkins et al. 2020)。それまで発見されていなかった短周期の軌道(熱い海王星砂漠の中)に海王星型惑星を発見した。(f) 燃え尽きた星をめぐる無傷の巨大惑星候補の発見(Vanderburg et al. 2020)。白色矮星の周りを周期 1.4 日で公転する巨大惑星候補を発見した。(g) 若い恒星「けんびきょう座 AU 星」をめぐる惑星を発見(Plavchan et al. 2020)。太陽系から 32 光年の距離にある年齢 22Myr の若い恒星 AU Mic の周りに 2 つのトランジット惑星を発見した。(h) LCO Commissions New Multi-Channel Instrument (Narita et al. 2020)。MuSCAT3 が完成し、MuSCAT・MuSCAT2 と合わせて北半球の多色同時観測ネットワークが完成した。本論文は 2022 年に

Clarivate 社の InCites で TOP1%補正論文となった。(i) 第二の地球を発見するための新しい多色同時撮像カメラ MuSCAT2 が完成(Narita et al. 2019). MuSCAT2 が完成し, 世界最高レベルの測光精度を 4 色同時に達成できることを示した. 本論文は 2022 年に Clarivate 社の InCites で TOP1%補正論文となった.

公募研究 A03: 地球型惑星の初期水量起源と水散逸進化(黒川), 地球型惑星衝突による大気散逸量と大気安定性(黒崎)で成果を得た.

研究項目 B03 計画研究 B03 班: 以下に代表的な観測的科学成果と開発的成果を挙げる. なお, ここには B03 班の公募研究による成果も含む. (a) SAND と名付けた以下の仕様を持つ赤外線分光器の開発を進めた. (a-1) テレダイン社の高感度 2048x2048 素子 HgCdTe と専用読出装置 SIDECAR を利用, (a-2)近赤外線の z および Y バンドを同時にカバー, (a-3)エシェル回折格子を用いて波長分解能 60,000 を達成, (a-4)フアブリペローフィルターを用いた高精度波長校正, (a-5)光ファイバーによる望遠鏡からの光の分光器への伝送, (a-6)イメージスライサーの利用による望遠鏡を含めた高効率化 (約 20%). (b) IRSF 望遠鏡のリモート観測化のための制御系の更新も完遂した. さらに, PRIME 望遠鏡の主焦点, IRSF 望遠鏡のカセグレン焦点でのファイバーの導入を可能とした. (c) すばる望遠鏡用赤外分光器を光周波数コムと共に長期運用し, 大口径望遠鏡に搭載した世界最高速度決定精度 (5 年間装置安定性 2m/s) の赤外線分光器として, 戦略枠観測 (計 175 夜)・インテンシブ観測 (計 113.5 夜) を含む多数の共同利用観測に提供した. (d) すばる戦略枠観測 (PI: 佐藤) として赤外線分光器による晩期赤色矮星まわりの惑星探査を推進し, ハビタブルゾーンを横切る楕円軌道を持つ 4 地球質量の惑星を発見した (Harakawa et al. 2022). これは, 赤外線ドップラー法による最初の惑星発見であり, 掲載誌における論文のダウンロード数 (2022 年末で約 2600) および注目数 (同約 600 アルトメトリクス) は極めて高い. また, 地球近傍 (22pc) に地球と同じサイズの惑星も発見した (Hirano et al. 2023). 同プロジェクトに基づく複数の有望天体および巨大惑星の統計への制限の論文化を今後進める. 国際協力観測も進めており, 成果は加速すると期待される. (e) すばるインテンシブ観測 (PI: 成田@A03 班) を中心として, TESS 望遠鏡による惑星候補のフォローアップ観測を進めた. その結果, 複数のハビタブル惑星 (Delrez et al. 2022, Esparza-Borges et al. 2022, Cadieux et al. 2022), ハビタブルゾーン近傍の地球型惑星 (Fukui et al. 2022) を発見した. (f) K2 ミッションのフォローアップ観測を様々な望遠鏡を用いて行った. その結果, 本研究対象である若い惑星や近傍 M 型星を含む系外惑星を日本主導分で合計 200 個以上発見した (Livingston et al. 2018a, b 引用合計 95 回 当時東大院生, de Leon et al. 2021 当時東大院生; Christiansen et al. 2022 など). (g) 本研究領域のイントロダクションで紹介されたような空隙構造・渦巻腕構造を持つ原始惑星系円盤中に, 実際に原始惑星が存在することを直接観測により発見した (Currie et al. 2022, Nature Astronomy). 世界で 2 例目の確実な原始惑星, かつ, 最も若い恒星まわりの原始惑星である. (h) JWST 宇宙望遠鏡による系外惑星の直接観測を国際協力に基づき進め, 5 ミクロン以上の赤外線ですべて系外惑星の撮像に成功し (Carter et al. 2023), 1-20 ミクロンでの系外惑星大気スペクトルの取得に成功した (Miles et al. 2023). 合計約 3000 ダウンロードと高く注目された. (i) 高分散赤外線分光器の利点を生かした相関法により系外惑星大気の検出を進め, 世界初の OH 分子の検出に成功した (Nugroho et al. 2021). (j) 7 つの地球型惑星を持つ低温・低質量の恒星 TRAPPIST-1 および年齢 2 千万年の若い恒星 AU Mic に対する赤外線口シター効果の観測により, この地球型惑星系および若い恒星系では星の自転軸と惑星の公転軸がほぼそろっていることを初めて解明した (Hirano et al. 2020a,b). 地球型かつハビタブルゾーンにある惑星で本効果が測定されたのは世界で初めてである. 地球型惑星の発見だけでなく, それらの性質に迫る上で, 重要なステップと言える. (k) 位置天文学の手法を取り入れて背景星の混入を除去することにより, 星形成領域における浮遊惑星を一度に約 100 個発見した (Miret-Roig et al. 2022, Nature Astronomy). その統計から, これらの浮遊惑星が重力不安定性ではなく, 円盤質量降着による惑星が放出された可能性が高いことを示した. (l) 系外惑星における光合成の蛍光とその観測可能性についてのアストロバイオロジー成果を論文化した (Komatsu et al. 2023). これらの成果はいずれも, 本領域研究のテーマである太陽系を含む「惑星の形成と進化の理解」に繋がる系外惑星の観測に新機軸をもたらした.