

領域略称名：星惑星形成
領域番号：6002

令和5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）」
に係る研究成果報告書（研究領域）兼
事後評価報告書

「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」

領域設定期間

平成30年度～令和4年度

令和5年6月

領域代表者 名古屋大学・理学部・教授・犬塚 修一郎

目 次

研究組織

- 1 総括班・総括班以外の計画研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
- 2 公募研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

研究領域全体に係る事項

- 3 交付決定額・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
- 4 研究領域の目的及び概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
- 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況・・・・・・・・ 10
- 6 研究目的の達成度及び主な成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
- 7 研究発表の状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 17
- 8 研究組織の連携体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22
- 9 研究費の使用状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
- 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25
- 11 若手研究者の育成に関する取組実績・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
- 12 総括班評価者による評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27

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。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

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]
X00 総	18H05436 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	平成30年度 ～ 令和4年度	犬塚 修一郎	名古屋大学・理学系・教授	3
A01 計	18H05437 星団形成論の確立と銀河系進化の理論的解明	平成30年度 ～ 令和4年度	犬塚 修一郎	名古屋大学・理学系・教授	6
A02 計	8H05438 多様な原始惑星系円盤における惑星形成過程の理論的解明	平成30年度 ～ 令和4年度	小久保 英一郎	国立天文台・教授	6
A03 計	18H05439 惑星大気の形成・進化とその多様性の解明	平成30年度 ～ 令和4年度	生駒 大洋	国立天文台・教授	4
B01 計	18H05440 巨大分子雲における星団形成機構の観測的解明	平成30年度 ～ 令和4年度	大西 利和	大阪公立大学・理学系・教授	6
B02 計	18H05441 多様な環境下における原始惑星系円盤進化の観測的解明	平成30年度 ～ 令和4年度	百瀬 宗武	茨城大学・理学野・教授	7
B03 計	18H05442 赤外線による若い惑星とハビタブル惑星の観測の新機軸	平成30年度 ～ 令和4年度	田村 元秀	東京大学・理学系・教授	5
計		平成30年度 ～ 令和4年度			
計		平成30年度 ～ 令和4年度			
計		平成30年度 ～ 令和4年度			
総括班・総括班以外の計画研究 計 6 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。）

2 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 ₂ 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氣的効果と輻 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 形成長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	ラミレス 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 メタノールメ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。）

研究領域全体に係る事項

3 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

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

系外惑星科学の展開と現在の課題 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(図1)。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2f)。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2d, Inutsuka 2001)の予言が定量的にハーシエ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、A02班のメンバーらは物質科学的アプローチを含む本格的なダスト粒子のマイクロスケール・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

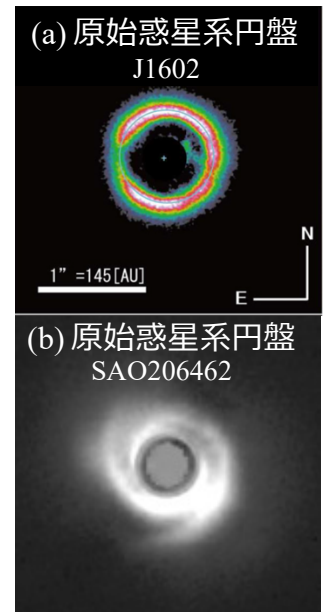


図1: SEEDS プロジェクトにより観測された原始惑星系円盤

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。

新しい星形成論に基づき、銀河スケールでの星惑星研究にパラダイムシフトをもたらし、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。

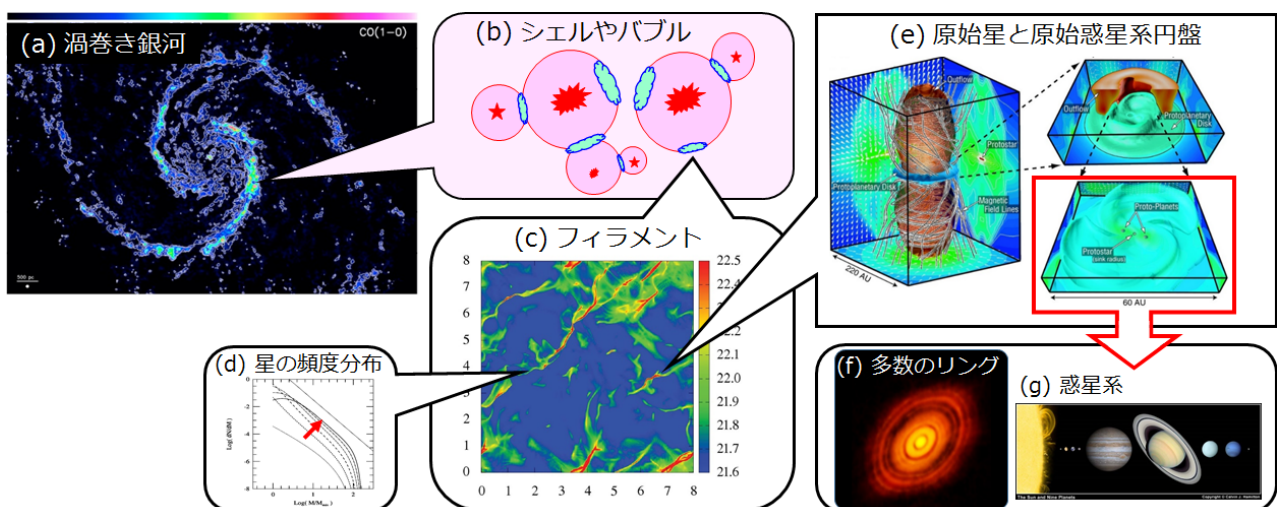


図 2：銀河スケールでの星と惑星の形成

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況)

審査結果の所見は以下である。「本研究領域は、最先端のミリ波・サブミリ波望遠鏡や特色ある赤外線望遠鏡と観測装置を駆使して新しい観測データを得るとともに、星惑星形成や惑星大気形成の理論研究と密接に連携し、ハビタブル惑星系の起源を銀河系スケールで統合的に解明しようとする挑戦的な提案である。観測と理論の両面から星惑星系の形成と進化のシナリオを見直し、重元素に富む太陽系の形成史を銀河系規模で考えるという太陽系史研究のパラダイムシフトを目指す。特定領域研究「太陽系外惑星科学の展開」(平成 16-20 年度)や新学術領域研究「太陽系外惑星の新機軸」(平成 23-27 年度)の成果に立脚しており、着実な成果が期待できる。新たに大気形成論の研究者が参画することによって研究体制が強化されており、近年の発展が目覚ましく国際的な競争も激しい当該分野においても、世界をけん引する研究領域となることが期待される。

研究組織は三つの計画研究からなる観測組織と三つの計画研究からなる理論組織からなり、各計画研究の実施計画は十分に説得力がある。新たな装置開発についても現実的な計画が立てられており、十分に遂行できるものと期待される。一方で、本研究領域の推進のためには、個々の計画研究の核をなすプロジェクト間での密な連携が極めて重要である。研究領域内の有機的なつながりを一層促進するための工夫や、各計画研究間の連携の強化が望まれる。

(留意事項)

- ・既存の望遠鏡計画の足し合わせとならないよう、それぞれの成果から理論を固めていくという連携を行った上で、領域全体として研究が進展するように総括班を運営することが重要である。
- ・総括班、計画研究「A01」「A02」の経費について、他のプロジェクト経費との重複や過度の集中との誤解を受けないよう、丁寧に説明していく必要がある。」

指摘を受けた領域内の有機的連携の強化を図るため、以下のような様々な対応・企画を行った。

□ 領域大研究会(国内):この研究会は、各計画研究・公募研究の進捗を領域内で共有しつつ、本研究領域の今後の方針を議論する上で最も重要なものと位置付けて毎年開催した。コロナ禍でオンラインになることもあったが、毎回100名を超える研究者が参加した。

□ ラボ・ローテーション:総括班の判断のもと、若手研究者を別の計画研究・別の機関の研究室に短期または中期に滞在する経費を支出し、研究会・セミナーよりも遥かに密度の高い領域内連携や共同研究を実現することを目指した企画である。コロナ禍のため、中断せざるを得ない時期もあったが、延べ7件(2019年度4件、2021年度2件、2022年度1件)のラボ・ローテーションを行なった。

□ 国際シンポジウムの開催:計画研究ベースの国際シンポジウムを開催した(A01, A03, B03)。当該分野にとって最大最重要の国際会議「Protostars and Planets VII」の開催(2023年4月)

□ 国内合同研究会:A02-B02の共同キックオフミーティング、「星・惑星形成再検討会(A01,A02,B02合同)」、「円盤風による原始惑星進化と惑星形成研究(総括班主催, A01-A02参加)」、A02-A03合同研究会、「低金属化における星・惑星形成」研究会(B02主催, A01,A02参加)などを開催し、複数の計画研究をまたがる共同研究を促進した。

□ 領域横断の月例セミナー:TV会議による「星・惑星形成ゼミ」を毎月開催。毎回10拠点以上。参加者は毎回40名以上のセミナーである。計画研究間の科議論を振興し、若手教育に役割を果たした。

また一つ目の留意項目については、前述の「密な連携のために行なっている事業」は総括班が主体となって行なっている。特に、毎月行われるTV会議「星・惑星形成ゼミ」や「ラボ・ローテーション」は総括班の労力は大きい、非常に有効に連携を推進している。

2番目の留意項目については、総括班・A01,A02班とも他の班と比べると予算ははるかに小さい。しかし、計画研究A01,A02は以下のページ「11 若手研究者の育成に関する取組実績」で記述しているように若手研究者の教育(助教や博士研究員の輩出)に成功しており、分野の中での活躍は目覚ましい。また、総括班は上記のように連携のために重要な役割をなしている。従って、経費の過度の集中という誤解を受けることはないと考えている。

（中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況）

中間評価結果の所見は以下である。「本研究領域は、最先端のミリ波・サブミリ波望遠鏡や特色ある赤外線望遠鏡と観測装置を駆使して新しい観測データを得るとともに、星惑星形成や惑星大気形成の理論研究と密接に連携し、ハビタブル惑星系の起源を銀河系スケールで統合的に解明しようとする研究である。計画研究と公募研究の調和が図られ、既に多くの成果が論文として発表されていることは評価に値する。新たに100個以上の太陽系外惑星を発見するなど若手研究者の活躍による期待以上の進展も見られ、若手育成も進んでいる。領域大研究会、月例ゼミ、ラボローテーションなどの連携強化策、若手育成策が順調に機能していることがわかる。日本独自の装置開発を進めており、今後これらの新しい装置による観測を実現し、更に大きな進展となることを期待する。一方、「太陽系の誕生場所を突き止める」という壮大な目標を達成するには説得力のある説明が必要であり、より具体的な戦略が必要である。また、他の新学術領域研究や異分野との交流や融合を通じた更なる発展にも期待する。」

中間発表以降に新しい装置の開発により以下のようなさまざまな成果が得られた。

計画研究 B01 では、ミリ波観測システム的大幅な広帯域化に成功した。1.85m 電波望遠鏡に搭載して観測を行い、230 から 345GHz 帯に渡る 6 本の CO 分子同位体スペクトルの同時受信を初めて実現した。当初予定の IF の帯域 4-18GHz を大幅に上回る帯域 4-21GHz も実現した。これらの成果は、論文として出版され、プレスリリースなども行った。TAO 望遠鏡の MIMUZUKU に搭載するオートガイダー・シャックハルトマンセンサーの I-band 化については、国内で完成・試験を実施、2022 年 5 月にチリに輸送した。MIMUZUKU に関しては、すばる望遠鏡での試験観測に成功後 TAO 搭載準備を進めている。

計画研究 B02 では、京都大学・せいめい望遠鏡に搭載する新装置である近赤外線偏光撮像装置の開発を進めた。京都大学吉田キャンパスで組み上げを行ったのち望遠鏡に装着し、2022 年 12 月に、国内企業が開発・製造し天体用途で初めて使用する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、初期成果を得るとともに、多様な星団環境下における円盤存在度の統計や磁場構造の解明に寄与する準備を整える予定である。

計画研究 A03 では、可視光多色撮像装置 3 号機 (MuSCAT3) の開発が完了し、2020 年 9 月にファーストライトを迎えた。これによって、国立天文台ハワイ観測所岡山分室の MuSCAT1 およびスペイン領テネリフェ島テイデ観測所の MuSCAT2 を合わせて、北半球における 24 時間トランジット観測体制を確立することができた。そして、全天系外惑星探索衛星 TESS によって光度変動が確認された恒星に対して、MuSCAT1-3 を用いた追観測を精力的に行った。TESS の検出した恒星光度変動には惑星由来でないものが多くあったが、我々の追観測によってすでにハビタブルゾーンに位置するものも含めて、多くの惑星を発見することに成功した。そのなかには、大気散逸が起きている、または、過去に経験したと考えられる惑星が複数個発見されており、それらは大気形成・進化理論の検証に有用な天体である。

また、太陽系誕生場所を突き止めるという壮大な目標を達成するために、総力的に取り組んだ。多くの恒星は星団として形成されると考えられている。星団の恒星数や大きさは、その星団中で形成される惑星系の力学的構造や物質科学的特徴を決める重要な要因になっている。計画研究 A02 では、太陽がどのような星団で誕生したかについて新しいモデルを構築した(Arakawa & Kokubo 2023)。太陽も星団内で誕生したと考えられている。太陽の誕生星団の恒星の個数を制限するために、太陽系で最も古いダストに含まれるアルミニウムに富む鉱物(CAI)に注目した。アルミニウム 26 という同位体は、コア崩壊型超新星爆発によって太陽系に注入されたと考えられている。そして、この注入は、太陽系の歴史の最初の 10 万年の間(CAI の形成期)に起こったと考えられる。したがって、誕生星団での星形成期間中に、少なくとも 1 つのコア崩壊型超新星爆発が発生したはずである。ある期間にコア崩壊型超新星爆発が発生する確率をモデル化し、それを使って、必要な星団の恒星数を計算した。その結果、誕生星団の恒星数は、従来は 500 個程度と見積もられていたが、もっと多く、2000-20000 個であることがわかった。この成果は nature に RESEARCH HIGHLIGHT として紹介された。

また、計画研究 B03 では、すばる望遠鏡に搭載した赤外線分光器および超補償光学系によって、若い惑星のロシター効果を用いた軌道制限、最も若い原始惑星の発見、ハビタブル地球型惑星のロシター効果を用いた軌道制限、すばる戦略観測に基づくハビタブルゾーンを横切る惑星の赤外線による発見、TESS 衛星と連携した複数のハビタブル地球型惑星の発見、などにおいて世界的成果を挙げた。これらの成果は、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。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(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、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(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 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

成分および大気の特性を観測的に制約し、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)⁶⁰Fe 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 μm 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: CO₂ 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・ブラサー), 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量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ドレーン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 SIDE CAR 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)エシエ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**で初め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** に対する赤外線ロ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.

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和5年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

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 Leptonic Components" *ApJ* 915, 84

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., Mojszis 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「星惑星形成」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 N₂-O₂ atmospheres in violent XUV environments through efficient atomic line radiative cooling, *Astrophys. J.*, 937, id.72, 18 pp.
- *Kawauchi, 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 H₂-H₂O 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.

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本新学術領域は6つの計画研究からなる。それぞれ3つの理論研究手法(A01-A03)と天文観測研究手法(B01-B03)で、星形成(A01,B01)、惑星形成(A02,B02)、系外惑星(A03,B03)について研究を行っている。研究手法が異なり研究対象が重なっているため、図3のようにそれぞれの計画研究は密に結びついており、有機的な共同研究が生まれた。

総括班が研究企画を行ない研究計画間の連携を推進した。企画の中で「大研究会」、「星惑星ゼミ」、「ラボ・ローテーション」が特に効果的に連携を促進した。領域全体の「大研究会」は、コロナ禍で対面で行えない年もあったがオンラインに切り替えるなどして、毎年実施した。また、オンライン会議で「星惑星形成ゼミ」を毎月開催している。これらの会議には公募研究の採択研究者も参加しており、研究計画間のみならず公募研究との共同研究も促進されている。そして、各研究計画班間で若手研究者を短中期派遣し合う「ラボ・ローテーション」も行なった。コロナ禍以降は多くの「ラボ・ローテーション」の実施は難しかったが、代替りのオンラインでの若手研究会などにより研究計画間や公募研究との共同研究が促進された。また、これらの企画は若手育成にも非常に役立った。

毎月オンラインで開催している「星・惑星形成ゼミ」では毎回10以上の大学・研究所から40名以上の参加者を得て開催している。その全参加者リストや会議の内容は以下のウェブで公開している。このセミナーのおかげで毎月最新の情報を共有できている。

<https://sites.google.com/view/spfseminar/home>

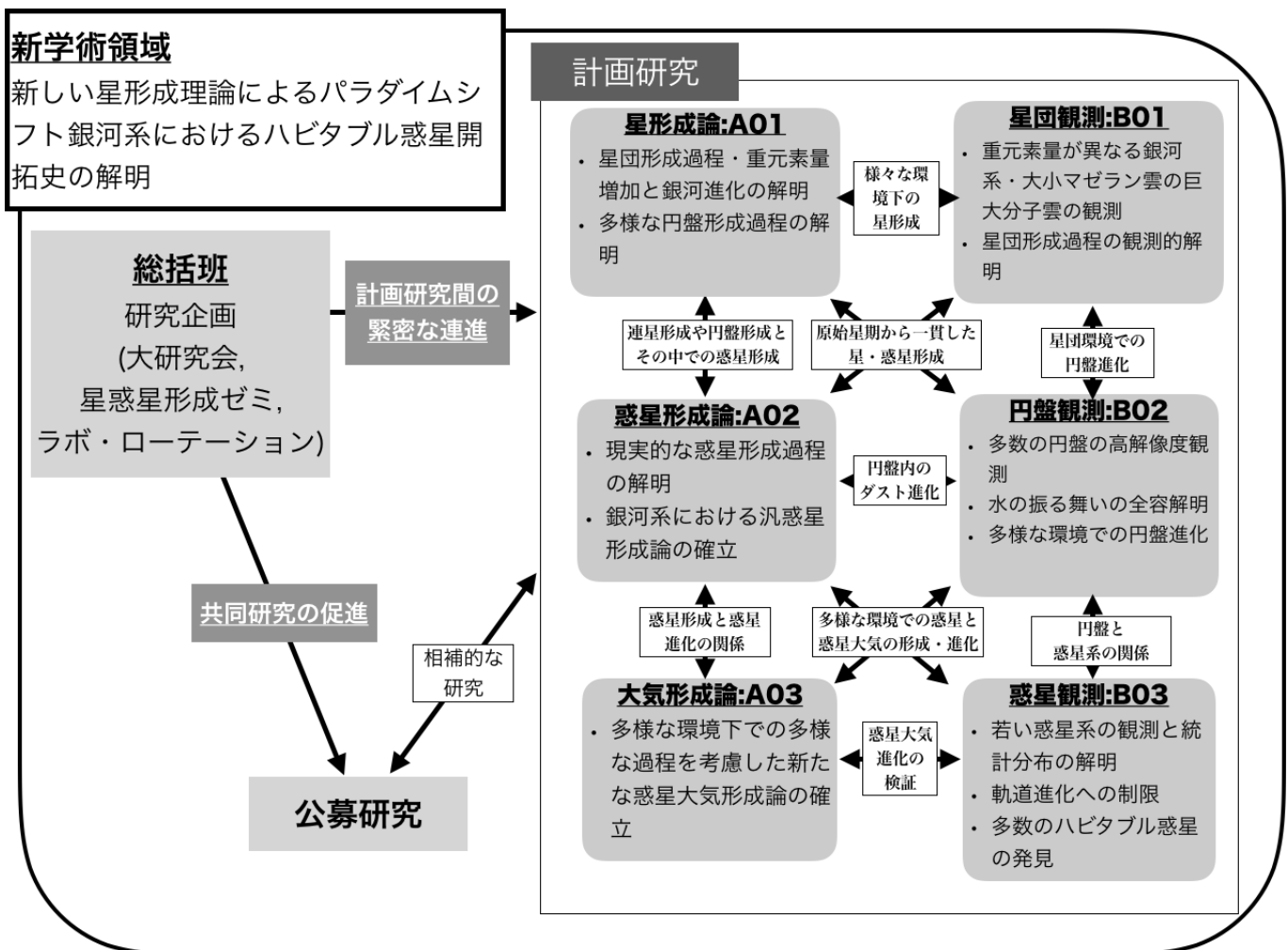


図3: 研究組織

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

それぞれの研究計画では以下のように研究費を使用している。全ての班で最終年度の繰越しが承認された。

総括班では、それぞれの研究計画の情報共有や共同研究促進のためと、広報のため、主に活動をした。そのため、毎年の「大研究会」や毎月のオンライン「星・惑星ゼミ」を開催や「ラボ・ローテーション」のために研究費を用いている。これらの設備を作るために、研究費を活用している。また、これらの研究会に参加者を招聘するためや、若手研究者を研究会に派遣するために旅費を使用している。これらの企画の実行や研究成果の広報のために、研究補佐員を雇用している。また、本領域の広報のため、サーバを使用し、Web ページを作成したため、サーバ使用料とページ作成料に研究費を利用した。また、超大型国際会議「Protostars and Planets VII」の開催のために、上記の研究補佐員による活動、旅行会社によるサポート、サーバ借用、旅費などの経費を使用した。これらの結果、十分に共同研究が促進され、国際的なアピールにもつながった。上記の国際会議は最終年度の次年年度4月に行われ、繰越し経費も用いて開催された。

計画研究 A01 では、研究費の大部分は博士研究員の雇用経費とした。若手海外研究者や若手女性研究者も雇用しており、多様な人材育成を意識して雇用を行ってきた。すべての雇用した者は以下に記載し、期間中に異動をした者は移動した先も記載する。

特任助教：Valeska Valdivia (名古屋大学), PD：柿内健佑 (名古屋大学→東京大学 PD), PD：三杉佳明 (鹿児島大学→国立天文台 PD), 特任助教：石垣美歩 (東北大学→国立天文台・助教), PD 霜田治朗 (名古屋大学→宇宙線研究所助教), PD：Doris Arzoumanian (名古屋大学→海外 PD→NAOJ フェロー特任助教), PD:Torsten Stamer (名古屋大学→海外企業), PD：林航平 (東北大学→一関工高専助教)

計画研究 B01 での経費の多くは、広帯域受信機システム関連の受信機コンポーネント、デジタル分光計の開発、1.85m 望遠鏡関連のリモート観測化、TAO/MIMIZUKU のオートガイダーの I-Band 化に使用された。また、旅費として、チリや国立天文台野辺山・三鷹への出張に使用した。これ以外の経費で大きなものは人件費であり、これにより装置開発や本計画研究のサイエンスを推進した。消耗品に関しては、現在の観測システムに使用されているマイクロ波部品等をできる限り再利用することにより、使用する予算の適正化を図った。

計画研究 A02 では、研究費を主に人件費として使用した。この人件費で特任助教として若手ポスドクを国立天文台、東北大学でそれぞれ1名雇用した。これらのポスドクは研究計画の中心課題である、微惑星の形成、惑星の移動、について研究を推進し成果を挙げている。系外惑星研究のような新しい学問分野の若い研究者が常勤ポストを獲得するのは極めて難しい状況で、このような新分野開拓のための大型研究費で若い研究者の受け皿となれたことは分野への重要な貢献だと考えている。大型の設備備品としては、汎用 GPU クラスタ(国立天文台)、PC クラスタ(東北大学)を導入した。これらは、ダスト、微惑星の多体シミュレーション、ガス円盤の流体シミュレーションの研究で活用されている。

計画研究 B02 では、(A) せいめい望遠鏡に搭載する近赤外線偏光撮像装置に必要な物品、及び (B) ALMA をはじめとする観測データを解析に必要な計算機・ワークステーションとそれに従事する研究員人件費が主な支出項目であった。(A)に関する重要物品としては、装置の心臓部である InGaAs 赤外線イメージセンサー、センサーを稼働させるために必要な極低温冷凍機と真空容器、及び基板、特注品となるオフナー光学系凹面鏡である。(B)では、主に ALMA データの解析に使用する計算機・ワークステーション4台分を支出したほか、原始惑星系円盤の ALMA データ解析や様々なアーカイブデータを駆使した円盤の統計的研究に従事する研究員の人件費に大きな割合で支出を行った。領域設定期間最終年度

の繰越により、せいめい望遠鏡新装置の立ち上げを完了させ初期科学データを取得するとともに、デブリ円盤を含む円盤ダストの統計的研究の取りまとめを行う予定である。

計画研究 A03 では、可視光多色撮像装置 3 号機 (MuSCAT3) の開発およびハワイ州マウイ島への輸送、ハレアカラ観測所 LCO-2m 望遠鏡への設置に経費を用いた。コロナ禍による遅延等があったが、無事に 2020 年 9 月にファーストライトを迎えた。これ以外に、本計画研究に専念する特任助教 1 名と特任研究員合計 4 名を雇用した。

計画研究 B03 では、(A) 新型赤外線分光器の開発費、(B)既存の施設である南アフリカの IRSF 望遠鏡の改修費、および、(C) 各種望遠鏡で取得したデータ解析システムの構築が大きな割合を占め、かつ、時間を要するものとなっている。これまでの研究費のうち重要な物品費の件名とは以下の通りである（購入年度不順）。(1)赤外線検出器および読み出し装置一式、(2)赤外線回折格子、Richardson 社製 53B22ZD02-182E、(3)冷却 CCD カメラ、ビットラン・G1 BK50NIR、(4)望遠鏡制御用モータードライバー及び収納ラック、西村製作所製モータードライバー（特注品）、(5) 真空冷却チャンバー、Toyama、特注品、(6)VPH 光学素子、光貿易、特注品、(7)分光器光学系・ファイバー、Optcraft、特注品、(8)コネクタ切替装置、有限会社伊藤工業・特注品、(6) 解析・表示用 PC、マイクロソフト・SURFACE STD2。これ以外の経費で大きなものは人件費である。研究分担を含め、合計 2 名の研究員を雇用し、本研究に専念している。それぞれ、若手外国人研究者と若手女性研究者であり、ダイバーシティを意識した若手人材育成を行ってきた。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本領域では、応募時に「②当該領域の格段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」を選択した。本領域全体での研究対象は、銀河における星形成の研究から、それに伴い形成される原始惑星円盤の進化、そして、円盤中での系外惑星の形成まで、多岐にわたる。以下に、星形成環境から順に系外惑星までの、発展や展開について説明する。

大小様々な電波望遠鏡で得られたデータを用いることにより、様々なスケールでのガス同士の相互作用が星間物質のフィラメント形成や大質量星形成機構に決定的な影響を与えていることを観測的・理論的に明らかにしてきた。重元素量が銀河系の1/5である小マゼラン雲の観測では、分子雲コアの中心に存在する原始星から、銀河系と同様の性質を持つ分子ガスアウトフローを初めて検出、つまり、銀河系と同様の原始惑星系円盤が形成されているとの示唆を得た。これは、重元素量が銀河系の1/5以上の環境では、分子雲から原始星・原始惑星系円盤形成までの進化過程はユニバーサルであることを示している。

多様な原始惑星系円盤の構造進化や惑星材料物質の移動・成長の素過程を数値シミュレーションによって徹底的に解明し、新たな原始惑星系円盤モデル、ダスト成長モデル、微惑星形成モデル、惑星集積モデル、惑星移動モデル、等を構築した。これらの素過程のモデルは今後の惑星形成研究の新たな基盤となるだろう。また、明らかになった素過程を総合して、円盤から惑星までの包括的な惑星形成モデルを構築した。このモデルは惑星形成の新たな標準モデルとして、さらなる理論の発展や観測との比較の基礎となる。

アルマ望遠鏡やその開発に伴う受信機の高感度化は、星・惑星誕生のメカニズムの解明などに大きな発展をもたらしてきた。一方、様々な分子から放出される電波は、様々な周波数で放射されるため、広い周波数範囲を一度に観測できる受信システムの開発が追求されてきた。本研究では、その周波数範囲の広帯域化をさらに進め、同時に観測できる周波数範囲を数倍に広げること成功した。この広帯域化は、「アルマ望遠鏡将来開発ロードマップ」や「アルマ2計画」にも重点項目として取り上げられており、アルマ望遠鏡や他の大型電波望遠鏡への応用が期待される。

円盤観測では、2014年のALMA長基線試験観測によってもたらされたHL Tauのリング状構造発見以降、本領域の開始直前までに多数のリング状構造が発見されていた。しかし、その本性、特に惑星形成における位置付けについては十分明らかではなかった。本研究では、ダスト連続波データに対するスパーズモデリングを用いたイメージングや、CO輝線が示す圧力広がりを通じた水素ガスの定量化という新しい解析手法を開拓しながら、円盤内での惑星形成との繋がりをより強く示唆する結果を得た。これらの新解析手法が今後の広範な研究の基盤となる点も含め、当該領域の格段の発展に寄与したと考える。

また、当初の研究予定では水のスノーラインにのみ着目していたが、円盤内のそれ以外の揮発性分子が作るスノーラインが円盤ガス中の元素組成(C/O比)に大きな影響を与えることを明らかにした点は、系外惑星の大気を含む初期元素組成の決定に対する新たな情報提供である。さらに、近傍宇宙の太陽型星に付随する原始惑星系円盤にとどまらず、低金属環境下における円盤統計や連星系・低質量星に付随する円盤の詳細構造にまで研究対象を拡張することにも成功した。さらに、国産の赤外線イメージセンサーを天文用途で初稼働させた点は、今後の赤外線天文学の幅広い展開を可能とする。これらの点は、当該領域の飛躍的展開に寄与するものであると考える。

系外惑星研究では、ノーベル物理学賞の対象となった1995年の太陽型恒星を周回する系外惑星の発見以降、5000個を超える惑星が発見されているが、領域開始時において以下の2点は未解決の大問題として喫緊の課題となっていた。(1)多様な系外惑星の原因は何か？(2)第二の地球はあるのか？—本研究における円盤中の原始惑星の発見や若い惑星の軌道の特徴づけによって、多様な惑星系の成因がその始状態であることが強く示唆された。また、近い距離にある複数のハビタブル惑星の発見は最も第二の地球の有望な候補となり、今後のバイオシグナチャーを含む大気の検出に繋がると期待される。これらの課題に一定の回答を提示した本成果は「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を当初の目標以上に進めた」と考えている。

11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和5年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本研究領域は若手研究者の育成と輩出を強く意識している。領域全体ではポスドクが23人雇用されており、領域発足後に6人が常勤職に異動した。また、ポスドク以上の若手研究者でも15人が異動等により昇級した。以下に、各計画研究の取り組みの詳細を示す。

計画研究 A01

石垣美歩は新学術領域の博士研究員として研究成果を挙げて、国立天文台の助教に就任した。同様に、林航平は一関工高専の助教に就任した。霜田治朗が東京大学宇宙線研究所の特任助教に就任した。Doris Arzoumanian は国立天文台のNAOJフェローに就任した。

計画研究 B01 本計画研究で雇用した西村淳氏は、1.85m 望遠鏡のアップデートや受信機・分光計の開発に携わった後、2021年3月から東大天文センターのTAOグループの特任助教を経た後、2021年10月から国立天文台野辺山の特任准教授に就任した。また、研究員として大阪公立大学で研究遂行に携わった徳田一起氏は、九州大学/国立天文台の特任助教に就任した(2022年4月)。大西利和が指導教員であった増井翔氏は、本研究での広帯域受信システムの開発に大きな貢献を果たし、その内容で博士論文を提出(2023年3月学位授与)し、国立天文台先端技術センターのプロジェクト研究員に就任した(2023年4月)。

計画研究 A02 特任助教として若手理論研究者2名(国立天文台:高橋実道氏,東北大学:田中佑希氏)を雇用してきた。高橋氏は2023年2月に鹿児島大学に異動し、特任研究員として原始惑星系円盤の理論と観測の研究を続けている。田中氏は2023年4月に福島工業高等専門学校一般教科(物理)の助教(任期なし)に着任した。

計画研究 B02 計画研究 B02 では、特任助教として雇用した塚越崇博士が、足利大学准教授(任期なし)に着任した。アーカイブデータを駆使して円盤の統計的研究を行う若手研究者(水木敏幸博士,茨城大学)、ALMAデータを利用して低金属量環境下での星・惑星形成を行う若手女性研究者(泉奈都子博士,茨城大学)、ALMAデータを用いて円盤の詳細構造を調べる研究を行う若手外国人研究者(キムソジョン博士,茨城大学)を雇用してきた。水木敏幸氏は、残骸円盤を中心とした円盤統計に取り組んでおり、系外惑星研究ともつながる新たな領域を切り拓きつつある。泉氏は、台湾中央研究院の博士研究員として移籍後も、研究協力者として、銀河系外縁部の星・惑星形成研究に共同で取り組んでおり、JWSTのGTOプログラム主要なメンバーとして活躍をしている。キム氏も、北京清華大学に博士研究員として移籍し、研究協力者として引き続き活動した。以上を通じて、外国人や女性の若手育成・国際交流の促進に寄与した。

計画研究 A03 計画研究 A03 では、若手の研究分担者の成田憲保が平成30年度に東京大学助教からアストロバイロロジーセンター特任准教授に就任し、令和元年度に東京大学教授に就任した。また、若手研究者(福井暁彦,東京大)と若手女性研究者2名(東北大学/寺田香織,東京大学/川内紀代恵)を雇用した。川内紀代恵は令和5年4月に立命館大学助教に就任した。また、実施期間中に6名が博士(理学)を取得している(青山雄彦・中山陽史・柴田翔・木村真博・渡辺紀治・森万由子,東京大学)。

計画研究 B03 計画研究 B03 では、観測・解析に専念する開発に若手外国人研究者(John Livingston博士,東京大学;浦郷陸博士,鹿児島大学)、装置開発に専念する若手女性研究者(高橋葵博士,アストロバイロロジーセンター)を雇用してきた。Livingston氏は、K2ミッションのフォローアップ国際プロジェクトのコアメンバーとして活躍している。高橋氏は、得意な真空低温技術を活かして装置開発のコアメンバーとなった。浦郷氏は、南アフリカにも滞在し、現地との関係を深めた。このように、本班では外国人や女性の若手育成・国際交流という観点でも留意してきた。

12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

本新学術領域は幅広い分野(天文学から地球物理学)に跨る。そのため、専門分野が大きく異なる5名の総括班評価者が総合的に評価する体制をとった。以下、各評価者からの評価は以下である。なお、それぞれの評価は受け取った書面の内容を「」付きで直接転記する。

塚本尚義（北海道大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門 教授 専門は宇宙化学・惑星科学）

「本研究課題は、代表者の犬塚修一郎さんの強力なリーダーシップのもと、着実かつ順調に当初計画に従い研究が進んだ。特に理論分野は、当初計画を上回るペースだった。観測分野は、機器開発を主にしているので、当初計画を上回る必要は全くなく、当初計画通りというのは、理論分野同様に極めて順調ということである。発足時に指摘されていた領域間の連携強化については、分野横断の研究集会・セミナーの開催とラボ・ローテーション企画により十分成果が上がり、若手育成活性化にも役立った。その成果は、若手も学生からポスドク、ポスドクから就職のステップアップをしている数が多く、本学術領域の科学がさらに発展していく人材育成が行われた。代表者が中心になり計画されていた本分野最大の国際会議 Protostars and Planets VII は、パンデミックが収まった最終年度に無事開催でき、本研究課題の成果が国際発信され、本研究課題関係者の国際的評価が高まる大きな成功をおさめた。本研究課題の最大のテーマである「太陽系の誕生場所を突き止める」について、超新星が合成する短寿命核種を用いる新しいアプローチに進展があった。短寿命核種 ^{26}Al の量から太陽が誕生した星団が従来考えられていたものより約10倍大きい恒星数2000-20000個のものであることを突き止めた。その星団の場所については、現在の地球上に降り注ぐ短寿命核種 ^{60}Fe の量から銀河系内側領域に太陽系が滞在していた期間とともに推定する方法で定量化できることを示した。また、銀河においてハビタブル惑星系が普遍的であることを示し、その形成環境について制約を与えた。これらの結果は従来の研究の延長だけでは得られない画期的なものであった。」

寺澤敏夫（東京大学 宇宙線研究所 名誉教授 専門は地球磁気圏とプラズマ宇宙物理学）

「評価者の専門分野から、研究項目A1~A3、特にその理論面を中心とした評価を述べる。

各研究計画とも、中間評価以後の論文数の伸びに見られるように、研究が順調に進展した。特に、GAIA衛星、TESS衛星、JWSTを始めとする国外・国内の観測装置もたらす多量のデータに対応して、理論面からの強力な研究推進が有効に機能したことは特筆に値するだろう。関連する系外惑星研究の国際的な進展にも、国内共同研究体制を組織しタイムリーに対応している。

太陽系の歴史に関しては、太陽系だけに特化した従来のような研究ではなく、分子雲・原始星を構成要素とする銀河系全体の環境進化との有機的関連に踏み込み、新しいパラダイムを提示した。その中で、太陽系がその形成時の銀河系内側の位置から現在の位置まで外へ向けて移動した可能性を示したのは大きな成果である。その他、分子雲コアの角運動量の起源、太陽系形成初期の微惑星形成素過程、その後の円盤進化過程・惑星形成素過程、惑星大気形成史などについても多くの新しい知見を得て当初目標を上回る成果を得た。

また、常勤ポスト獲得が一般的に困難な状況にあって、多くの若手研究者に研究の機会を提供できたこと、そして、そのうち数人が専任ポストへの移行することができたことは本助成事業の大きな成果と考えられる。」

柴田一成（同志社大学 特別客員教授、京都大学 名誉教授 専門は太陽物理学・プラズマ宇宙物理学）

「本領域は、中間評価以後、領域内の有機的連携の強化を図るため、領域大研究会（国内）、ラボ・ローテーション、国際会議「Protostars and Planets VII」の開催、国内合同研究会、領域横断の月例セミナー、などの試みを推進した。これらのうち、若手研究者を異なるグループに順繰りに短期滞在させて研究交流を深めるというラボ・ローテーションの企画は大変興味深い試みであり、評価できる。他分野にも波及すべき試みであろう。」

本領域研究の目的である、「太陽系の誕生場所を突き止める」という壮大な課題は、観測的には未確立とはいえ、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できた、という A01 班の成果は大変おもしろい。A02 班の惑星形成素過程の様々な理論研究は日本のお家芸として大きな成果を上げている。A03 班と B03 班は観測と理論の連携により新種の短周期の系外惑星を発見した。さらに赤色矮星まわりに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のは、赤外線ドップラー法による初の発見として特筆に値する。

観測プロジェクトの装置開発 (B01, B02, B03) に関しては、順調に開発が終了したことは評価できる。計画にあった B01 班の 1.85m 電波望遠鏡のチリへの移設と TAO が未完であることは、コロナ禍による遅れということで、やむを得ないだろう。」

有本信雄 (国立天文台 名誉教授 専門は銀河天文学)

「銀河系におけるハビタブル惑星系の開拓史を解明しようとする本研究は全体として順調に進展している。

(計画研究) A01 は太陽系起源を銀河系進化の中で捉えることを目指し、これまでに分子雲コアの角運動量の起源を明らかにしている。

A02 は微惑星形成に及ぼす有機物の影響、原始惑星円盤との相互作用による惑星移動などの素過程を明らかにし、研究の進展は順調である。

A03 は原始惑星が円盤ガスを獲得して大気を形成し、原始大気とマグマオーシャンが反応して水が生成することを明らかにしている。TESS 衛星との連携では大気観測候補惑星を多数発見しており、研究は順調に進展している。

B01 はチリへの移設準備や開発は順調である。一方、新型コロナが計画に与える影響を懸念している。

B02 は数 au スケールのダスト構造を発見し、惑星形成と直結する構造の解明に一步近づいている。原始惑星系円盤では氷-ダストを、原始星で水を検出して、水の振舞の新たな知見を得ている。研究は予定通りである。

B03 は K2 ミッションより 100 個以上の系外惑星を発見し、貴重なデータを提供した。また、7 つの地球型惑星を持つ恒星の惑星を観測し、星の自転軸と惑星の公転周期がほぼ揃っていることを発見した。これは地球型惑星の性質の解明への重要なステップである。研究は堅実に進展している。

本研究は銀河系における多様な惑星系の形成論を構築することを目的としているが、各研究計画班の全員が、銀河系の進化についての理解を共有することが必須である。太陽系が誕生した時の銀河系の姿を、主系列銀河の統計的描像の上で捉えておく必要がある。」

長谷川哲夫 (国立天文台 アルマプロジェクト 特任教授 専門は電波天文学)

「領域全体として組織的かつ活発に研究が展開されており、各研究班によって創出された研究成果の質も量も極めて高い。引き続き研究を進めるとともに、研究機関の後半となる今後は各研究班の研究成果を総合・統合して本研究の大きな目標にアプローチするための取り組みが必要となる。目下の研究環境は、新型コロナウイルス感染症の蔓延により、大勢の研究者が直接顔を合わせて議論することができない困難な状況ではあるが、ネットワークを使ったオンライン会議等により実質的にはそのかなりの部分を克服できている。研究項目 B01 においては、さまざまな望遠鏡を用いた観測やアーカイブデータの活用により、精力的な研究が進められている。特に ALMA 望遠鏡を用いた大マゼラン雲内の巨大分子雲の顕著なフィラメント形状の発見、およびそれに対応する銀河系内の巨大分子雲との比較研究は画期的なものである。研究項目 B01 において計画されている 1.85m 電波望遠鏡のチリへの移設や中間赤外線カメラ MIMIZUKU の TAO 望遠鏡への搭載などの事業は、新型コロナウイルス感染症の蔓延等の影響を受けることは避けられないが、流行の終息と同時に直ちに進め研究へのインパクトを最小にするよう綿密な検討と準備がなされている。その中で例えば 1.85m 望遠鏡に搭載する超広帯域受信機の開発成功は大変大きな成果である。」