

領域略称名：系外惑星 領域番号：2302

平成28年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「太陽系外惑星の新機軸：地球型惑星へ」

(領域設定期間)

平成23年度～平成27年度

平成28年6月

領域代表者 (自然科学研究機構 国立天文台・台長・林 正彦)

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究領域の設定目的の達成度	6
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	9
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	10
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	12
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	15
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	20
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	26
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	27
11. 総括班評価者による評価	28

研究組織 (総括：総括班、計画：総括班以外の計画研究、公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	23103001 太陽系外惑星の新機軸：地球型惑星へ	平成23年度～ 平成27年度	林 正彦	自然科学研究機構・国立天文台長	5
A01 計画	23103002 ガス惑星の直接撮像・分光と地球型惑星の検出	平成23年度～ 平成27年度	林 正彦	自然科学研究機構・国立天文台長	8
A02 計画	23103003 系外惑星大気の数値モデリングと形成進化理論	平成23年度～ 平成27年度	倉本 圭	北海道大学・理学研究院・教授	8
B01 計画	23103004 円盤から惑星へ	平成23年度～ 平成27年度	百瀬 宗武	茨城大学・理学部・教授	8
B02 計画	23103005 ハビタブル地球型惑星の形成理論	平成23年度～ 平成27年度	井田 茂	東京工業大学・地球生命研究所・教授	9
計画研究 計 5 件					
A01 公募	24103501 セグメント型望遠鏡のための共通光路シアーリングナル干渉計の開発	平成24年度～ 平成25年度	村上 尚史	北海道大学・工学系研究科・助教	分担者0 連携者2
A01 公募	24103508 地球型惑星検出を目指した視線速度測定近赤外線分光器のためのファイバー較正法の確立	平成24年度～ 平成25年度	西山 正吾	国立天文台・研究員	分担者0 連携者2
A01 公募	26103703 可視高精度分光撮像測光による系外惑星大気の研究	平成26年度～ 平成27年度	土居 守	東京大学・大学院理学系研究科・教授	分担者0 連携者1 2
A01 公募	26103705 可視・近赤外線6バンド同時精密トランジット観測で探る太陽系外惑星の大気組成	平成26年度～ 平成27年度	永山 貴宏	鹿児島大学・理工学域理学系・准助教	分担者0 連携者2
A01 公募	26103709 視線速度法による地球型惑星検出のための超広帯域光周波数コム	平成26年度～ 平成27年度	小谷 隆行	国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト室・助教	分担者0 連携

	開発				者4
A02 公募	24103505 深部対流を考慮した系外ガス惑星表層大気運動形態の多様性の研究	平成24年度～ 平成25年度	竹広 真一	京都大学・数理解析研究所・准教授	分担者0 連携者1
A02 公募	24103507 太陽系外惑星の内部構造モデル構築に向けたレーザー高圧物性実験からのアプローチ	平成24年度～ 平成25年度	佐野 孝好	大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教	なし
A2 公募	26103706 深部対流モデルによる系外惑星大気連動運動の多様性の数値的研究	平成26年度～ 平成27年度	竹広 真一	京都大学・数理解析研究所・准教授	分担者0 連携者1
B01 公募	24103502 新たなダスト発生機構:微惑星衝撃波による微惑星蒸発の検討	平成24年度～ 平成25年度	田中 今日子	北海道大学・低温科学研究所・研究員	分担者0 連携者2
B01 公募	24103503 巨大ガス惑星と原始惑星系円盤の共進化:インナーホール形成モデル	平成24年度～ 平成25年度	谷川 享行	北海道大学・低温科学研究所・研究員	なし
B01 公募	24103504 サブミリ波を用いた原始惑星系円盤の進化段階の観測的解明	平成24年度～ 平成25年度	塚越 崇	茨城大学・理学部・研究員	なし
B01 公募	26103702 原始惑星系円盤の多波長輻射平衡モデルの構築	平成26年度～ 平成27年度	花輪 知幸	千葉大学・先進科学センター・教授	なし
B01 公募	26103701 円盤ギャップ内のダストサイズ分布の決定:観測と直接比較可能な数理モデルの構築	平成26年度～ 平成27年度	金川 和弘	北海道大学・低温科学研究所・研究員	なし
B02 公募	26103711 形成過程から探る低温度星回りの短周期スーパーアースの大気および内部組成の起源	平成26年度～ 平成27年度	堀 安範	国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト室・特任助教	なし
公募研究 計 14 件					

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

『研究領域の研究目的及び全体構想と我が国の学術水準の向上・強化』

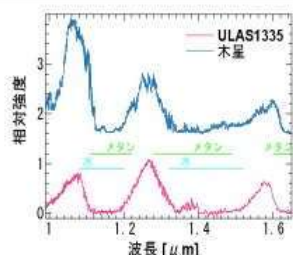
本領域では、天文学と惑星科学の密接な連携・融合によって、我が国において「系外惑星」という新たな学術領域を確立して世界的リードを狙うことで、当該分野における我が国の学術水準を飛躍的に向上・強化することを目的とする。その中心となるのは、直接的・間接的観測手法を用いた太陽系外惑星の検出である。これによって、木星型から地球型にいたる多様な惑星の性質や、その形成と進化の統一的な理解を目指す。木星型ガス惑星については、独自開発したすばる望遠鏡用の観測装置を用いて多数の惑星を直接検出し、軌道半径1AU程度の生命存在可能領域（ハビタブルゾーン）から太陽系のサイズに至る範囲でガス惑星を直接検出することを目指す。また、新たに高コントラスト赤外線分光器等を開発して、系外惑星大気を直接分光することにより、系外惑星を分光学的に特徴づける（キャラクタリゼーション）。地球型惑星については、ドップラー法、トランジット法、重力レンズ法による検出を推進し、低質量星周囲の生命存在可能領域にある地球型惑星の検出を目指す。また、すばる望遠鏡や、平成23年度から運用を開始した大型ミリ波・サブミリ波干渉計（ALMA）を用いた原始惑星系円盤の観測を推進するとともに、室内実験も併用して、円盤内で固体微粒子（ダスト）が成長して岩石コア（地球型惑星）の形成へといった過程や、巨大惑星によるギャップ形成などを明らかにし、惑星系の形成と進化の研究を推進する。これらの観測を、日本の独創的分野である地球型惑星の形成理論や惑星大気理論と密接に連携・融合させることで、地球型および木星型惑星の起源と形成を解明し、系外惑星における生命の議論にまで至ることを目標とする（下図参照）。これによって、天文学や惑星科学のみならず、地球科学や生物科学への多面的・学際的波及効果が期待される。また、本領域には多数の若手が参画しており、天文学・惑星科学の融合する新たな学術領域を担う第一線の研究者の育成を進める。

領域概念図 - 太陽系外惑星の新機軸：地球型惑星へ

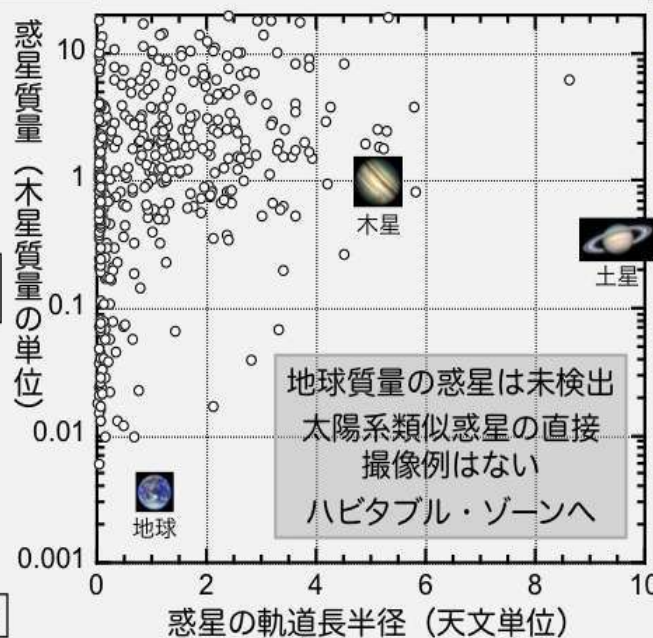
A: 木星型からハビタブル地球型まで



地球型・木星型惑星をハビタブルゾーンに検出、木星型を分光



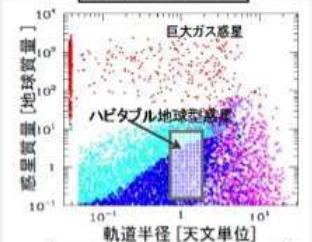
惑星大気モデリングと大気進化



B: 系外惑星の形成と進化



円盤から惑星へ



ハビタブル地球型惑星 汎惑星形成理論

『応募領域の着想に至った経緯：天文学と惑星科学の密接な連携』

1995年の太陽以外の恒星を周回する惑星（以下、系外惑星）の発見以来、系外惑星は宇宙論と並んで天文学における最重要課題となっている。その理由は、これらの研究は人類の根源的な問い「我々はどこから来たのか、我々は何者なのか、我々はどこに行くのか」（ゴーギャン）に科学的に答えようとしているからである。人類が長年かけて発見してきた太陽系内の8個の惑星に対し、わずか15年のあいだに500個近い系外惑星が発見された今、最も重要な次のマイルストーンは「直接撮像・分光」と「地球型惑星」である。我が国は、太陽系の起源の研究において、天文学と惑星科学の密接な連携関係を培い、世界をリ

ードする成果を挙げた。系外惑星に関しても、両分野の研究者が非常に大きな関心を寄せており、また本研究に先立つ特定領域研究（平成16～20年度）では、非常に高い評価（A⁺）を得た。しかしながら、系外惑星の研究をめぐる世界的競争は非常に激しく、我が国においても、本研究により両分野の連携・融合を一層強化し、系外惑星の研究をさらに発展させることが喫緊の課題である。

『これまでの研究成果の飛躍的发展：直接撮像・分光による惑星のキャラクタリゼーション』

これまでに発見された系外惑星のうち、大部分はドップラー法やトランジット法（惑星の主星面通過）で検出されており、ごく限られた範囲だが惑星大気の情報も得られるようになった。これらの手法では、主星近傍の系外惑星に検出バイアスがかかり（6AUまで調べるには約15年かかる；1AUは地球-太陽間の距離）、また太陽型ではあるが若いために活動性が高い恒星（Tタウリ型星）には適用できない。一方、直接観測では、そのような若い恒星を周回する若い惑星を検出し、分光することが可能となる。惑星系の内側の多様性が明らかになった現在、スノーラインを超えた外側領域(>4AU)の多様性や、円盤から形成されたばかりの初期状態としての若い惑星に迫るには、直接観測が不可欠なのである。さらに、直接分光まで行えば、ドップラー法やトランジット法では得られない惑星の色、光度、スペクトル、従って、温度や大気組成の情報まで手に入れることができ、単なる検出を超えた惑星系の特徴づけ（キャラクタリゼーション）が可能になる。

また、平成23年度からALMAが稼働を開始した。日米欧が対等に参画するこの国際観測施設が目指すテーマは、まさに惑星系形成であり、すでに重要な研究成果が出始めている。我が国では、この研究に取り組む研究者数は欧米に比して少ないが、天文学・惑星科学の研究者の連携・融合によるオールジャパン体制を築ける点が優れており、本領域研究はそれを強く推進するために重要な役割を果たしている。

『全体構想：研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか』

5年にわたる研究期間において、我々は以下の四つの研究項目の実現を目指す。

A01) 木星型惑星を直接検出し、また様々な手法を用いた地球型惑星の間接検出を推進する。

さらに、高コントラスト赤外線分光器を開発して、木星型惑星を直接分光し、その特徴を明らかにする（キャラクタリゼーション）。

A02) 直接分光によって得られたスペクトルを解釈し、惑星大気の化学的性質や進化を明らかにするための、汎惑星大気理論を構築する。

B01) ALMAやすばるを用いた原始惑星系円盤の観測や、ダストの成長実験を推進し、円盤物質から地球型惑星が形成されていく過程を解明する。

B02) ハビタブル地球型惑星を含む惑星形成理論を展開し、直接・間接観測から得られる系外惑星の統一的描像との比較を通して、汎惑星系形成理論を構築する。

『目的達成に向けての取り組み、発展方法』

上記の達成のために、本研究では、天文学・惑星科学の両分野にわたる日本の代表的研究者が、オールジャパン体制で連携・融合して研究を推進する。本領域の研究分担者・連携研究者は、全国の様々な大学・機関の研究者を含み、また若手も多く含んでいる。本領域では、これらの研究者間の共同研究の推進に積極的に取り組み、天文学・惑星科学にこだわらず分野横断的に研究員等を雇用し、新たな学術領域を担う人材育成に取り組む。このような取り組みを通して、5年後には世界をリードする人材が育成され、当該領域が継続的に発展する状況を作り出すことを目指す。

2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究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、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

【研究項目 A01】ガス惑星の直接撮像・分光と地球型惑星の検出

計画研究 A01「ガス惑星の直接撮像・分光と地球型惑星の検出」においては、研究期間内に主として以下の2点を達成することを目標としていた。すなわち、(1) 太陽系の惑星系と同程度の軌道（1-40 AU、スノーライン近傍とその外側）にある系外惑星を直接撮像すると同時に、種々の間接的手法により地球型惑星の検出を進める。(2) 世界最高レベルの波面補償光学やコロナグラフを用いた高解像度の高コントラスト赤外線面分光器を開発し、系外惑星の大気を分光して特徴づけ（キャラクターゼーション）を行う。

（1）ガス惑星の直接撮像と地球型惑星の間接検出

ガス惑星の直接検出に関しては、この5年間にすばる望遠鏡を用いた観測が順調に進み、新たに2個の恒星周囲にそれぞれ1個（合計2個）の惑星を直接撮影することに成功した（これを含めて、これまでに直接撮影された惑星は、6個の恒星周囲に9個しかない）。このうち GJ504b は、主星から約30天文単位の距離にあり、質量が木星の約4倍、表面温度が510K、年齢が1.6億歳のガス惑星であり、まさに「第二の木星」と呼ぶにふさわしい。またこれらの直接検出は、研究項目 B02 の理論研究に重要な観測情報を提供した。

間接的手法による検出では、重力マイクロレンズ効果を用いた観測によって、研究期間中に合計36個の系外惑星を検出した。その内訳は、木星型惑星が25個、海王星型惑星が10個、地球型惑星が1個だった。これらはすべて、スノーラインの外側に位置する冷たい惑星である。

（2）高コントラスト装置の開発

高コントラスト装置のうち、前置光学系として用いる超高次波面補償装置 SCExAO が完成し、既存の赤外線撮像装置と組合せて試験観測を行って性能を確認した。図 2-1 は、その性能を従来の波面補償光学装置（AO188）と比較したものである。SCExAO を使用した画像（左側）では、主星周囲のノイズ（補償されない高次波面誤差によって生じるスペックル）が約10倍低減されている。SCExAO と組合せて、惑星のスペクトルを観測するのに用いる高コントラスト赤外線分光器 CHARIS については、製作途中で分光素子をより高性能のものに交換する必要が生じたこと等の理由により工程に遅れが生じたが、現時点で完成してハワイ観測所に納入されており、7月から試験観測を開始する予定である。

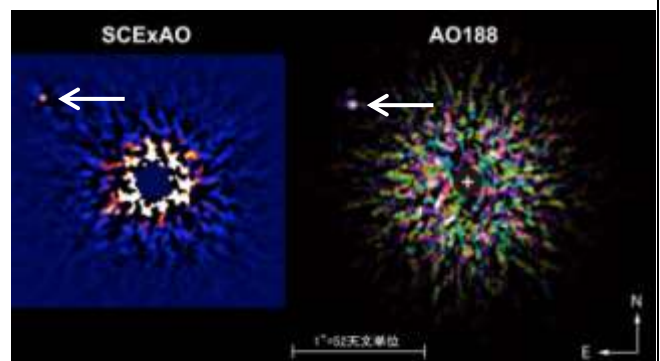


図 2-1. ゼノドロメグ座の星（中心）に付随する惑星 And b（矢印先の点）の画像比較。左が SCExAO によるもの、右が既存の波面補償光学装置 AO188 によるもの。

以上から、目標（1）については100%達成しており、また目標（2）についてはは SCExAO が100%、CHARIS が80%程度の達成度である。したがって計画研究 A01 全体については、90%程度の達成度となる。

【研究項目 A02】系外惑星大気の数値モデリングと形成進化理論

直接分光によって得られたスペクトルを解釈し、惑星大気の化学的性質や進化を明らかにするための、汎惑星大気理論を構築することを当初の目的とした。惑星大気の多様性と進化経路の解明、それと連動した理論スペクトル予測について、想定した達成度を超える成果を得ている。

（1）惑星大気の高多様性と進化経路の解明

巨大衝突による大規模融解状態から出発した地球型惑星の大気進化を初めて解明し、中心星からの距離に応じ、マグマオーシャンに覆われた暴走温室状態を持続する場合と、地表へ水蒸気凝結が生じ、その後安定に海洋が保持される場合に二分され、前者の継続時間が紫外線による水蒸気分解・散逸速度に支配されることを示した。さらに、惑星年齢と中心星からの距離の関数として惑星スペクトルを予測し、マグマオーシャン保有惑星と水惑星の観測可能性を定量的に明らかにした。海洋の安定性や大気組成を制御する重要な素過程である水素散逸過程について、散逸効率が先行研究の推定よりもきわめて高いこと、また大

規模大気散逸を経て大気質量が減少した後、水が両極域に局在化し、表層に液体の水を保持可能な惑星の軌道と年齢の条件が、著しく広がる可能性があることを明らかにした。今後多数の検出が期待される同期回転地球型惑星について、大気大循環シミュレーションを実施し、雲によるアルbedo上昇を考慮すると暴走温室効果の発生が抑制される（日射量にして2割増まで耐える）こと、またハビタブルゾーン内にある場合には、恒星直下点における活発な湿潤対流により全球炭素固定率が著しく上昇し、貧二酸化炭素大気を保有する可能性があることを明らかにした（図2-2）。

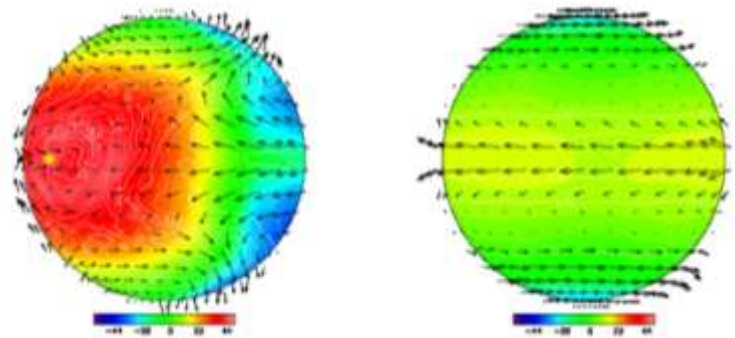


図 2-2: シミュレーションによって得られた、同期回転惑星（左）と地球条件惑星（右）の時間平均した表面気温分布と風速場（矢印）。同期回転惑星では対流活動が太陽直下点（黄丸）付近に集中し、そこで常時生じる雲が日射の反射に強く寄与する。

研究項目 A01 で予定していた新分光器による系外木星型惑星大気分光データの取得の前に研究期間が終了したが、最も重要な参照天体である木星について、世界初となる全凝結可能種の雲生成を同時に解く流体力学モデルと、水素豊富大気の放射モデルを構築し、雲生成の间歇性、雲対流による物質分布の決定機構、大気層の放射伝達と可視・熱放射域それぞれの全球スペクトルを支配する因子を明らかにした。

【研究項目 B01】円盤から惑星へ

研究項目 B01 では、観測・理論・実験を結集し、原始惑星系円盤から地球型惑星形成へと至る過程の全貌解明を目指した。その実現のため、下記に示す3つの個別目標を設定した。全項目で当初想定した達成度以上の進捗を得た。特に研究項目 B02 とは全項目で、研究項目 A01 とは(1)(2)で、それぞれ幅広い連携が展開され、想定を超える成果が多方面で挙げられた。

(1) 多波長観測による円盤構造と進化の解明

ALMA により、中質量星 HD142527 に付随する円盤内で、星間空間に比べガスに対しダストが30倍以上濃集した領域の存在を明かした。これは、軸対称で動径方向にべき分布を円盤初期条件として仮定していた古典的な太陽系起源論とは、全く異なる状況である。また、赤外線データの統計解析により、円盤寿命の環境依存性（主星質量、金属量等）も明らかにした。これらは惑星系の多様な形成過程を示すもので、想定以上の成果である。一方高解像度観測に基づく研究では、すばる望遠鏡によるダスト散乱偏光撮像により、惑星存在を想起させる溝構造や渦巻構造を多数見出した。特に、密度波理論に基づく渦巻の形状解析は、惑星位置を推定する標準的手法となった。ALMA においても、おうし座 HL 星に対する公開画像で示された溝構造の形成機構について、惑星ギャップの場合とダスト成長・破壊による場合でそれぞれ、独自の解釈を提唱した。うみへび座 TW 星に対しても、一酸化炭素のスノーライン付近に数海王星質量の惑星で説明可能な溝構造を1AUスケールの超高解像度観測により独自に発見した。観測結果自体はほぼ想定通りだったが、そこからは想定以上に多様な解釈を提示した。

(2) 円盤内固体物質の組成や成長の解明：ダストから微惑星へ

高空隙率氷ダストの付着成長により、微惑星が形成されうることを理論的に初めて示した。また、高空隙率ダスト存在の観測的実証に向け、観測と比較可能な高空隙率ダストの光学特性モデルを構築した。これらはこの後の研究発展の礎を築いた点も含め、想定を超える成果である。ダスト物性を基礎とした研究では、原始惑星系円盤や残骸円盤でみられる結晶化ダストの形成機構や、微惑星等からのダスト放出の解明で成果を得た。実験的手法では、天体衝突による残骸円盤へのダスト供給効率を明らかにするため、氷微惑星の衝突破壊を模擬できる低温衝突実験設備を整備した。そして、複数回衝突を経た氷小天体の衝突破壊強度は積算エネルギー密度で決まることを明らかにするなど、十分な成果を得た。

(3) 円盤内ガス物質の組成や化学進化の解明

円盤内での乱流拡散や重水素比まで考慮した化学反応ネットワークモデルを構築し、メタノールなどの大型有機分子の気相と固相での存在度比や、一酸化炭素分子の化学反応による減損を理論的に解明した。地球の海水に含まれる重水素の割合が宇宙元素組成に比べて有意に高いことや、近年原始星コアで地球の

海水よりも高い重水素比をもつ水蒸気が検出されたことに関連して、星形成過程における重水素濃縮過程と、円盤での水分子の破壊・再生成過程をモデル計算に基づき明らかにした。さらに N_2H^+ など主要イオン分子の円盤内存在度の解析解を求め、ALMA の円盤観測に対する確固とした解釈を与えた。

【研究項目 B02】ハビタブル地球型惑星の形成理論

2011 年 7 月以来、すでに 160 編以上の論文を国際ジャーナルに発表し、10 編以上が印刷中である。十分な成果のもとに目標の大半を達成した。

観測との比較においては、円盤については ALMA の観測の急進展に伴って、研究項目 B01 との連携が大いに進み、当初の計画にはなかった、惑星形成の母体となる円盤構造形成について大きな成果が得られた。また短周期スーパーアースの大気の観測も進み、地球型惑星大気のモデリングも予定以上に進展した。このように、観測の進展により、当初予定していなかった分野の理論モデリングが大きく進んだ。当初からあった研究計画の各項目についての達成度は以下である。

(1) 巨大ガス惑星の多様性

計画よりも根本に遡って、原始星および原始惑星系円盤の形成過程のシナリオの構築を行い、円盤ガスの磁気回転乱流の詳細を明らかにした。塵の空隙率進化に着目して、ガス抵抗による中心星落下を乗り越えて氷微惑星が形成されることを世界で初めて示した（研究項目 B01 の項目 2 にも記載）。また、新しい小石集積（ペブルアクリション）モデルにも着目し、小石の形成を明らかにした。当初の計画以上に達成できた。

巨大ガス惑星の連鎖的形成も実際に数値計算で示し、木星・土星系の形成の新しいモデルを提案した。円盤の粘性散逸や光蒸発、円盤風による散逸に関しても詳細な解析を行った。目標は達成した。

巨大ガス惑星の軌道不安定の高精度軌道計算を行い、内側に飛ばされた惑星のうちの 30% は潮汐力により（逆行のものを含む）ホットジュピターとなり、中間領域には楕円軌道のものが残ることを示し、観測データを見事に説明した。研究項目 A01 の直接撮像法が目指す遠方領域の巨大ガス惑星の分布も予測した。予定以上の進展をした。

(2) スーパーアースの多様性

ケプラー衛星望遠鏡などの観測結果は、短周期スーパーアース（大型地球型惑星）は普遍的に存在し、大多数は複数系であることを示す。それらの軌道分布は中心星と円盤ガスの磁気結合で決まるはずだが、観測の急速発展によりバルク密度（組成）に大きな多様性があることがわかった。これは大気や揮発性成分の多様性を反映しているはずで、観測データを基礎にした惑星の組成や大気のモデリングを行い、さらに新たな観測も提案した。方向性を若干変えたが、十分な成果を得た。

原始惑星の巨大衝突の詳細な軌道計算により、中心星に近いスーパーアースの軌道分布を統計的に計算し、ケプラー衛星望遠鏡のデータを定量的に説明した。十分な成果を得た。

(3) ハビタブル惑星の存在確率

ハビタブル惑星の条件には、多数あるが、軌道安定性や衛星の存在の影響について一般的モデルの構築を行った。また、ハビタブルゾーンの地球型惑星に運ばれる H_2O 量が、陸と海が共存する範囲という新しい観点に注目し、小石での輸送のほか、巨大ガス惑星による氷微惑星の散乱についても徹底的に調べた。包括的なハビタブル惑星の存在確率の導出にまでは至らなかったが、ハビタブル惑星の重要な条件のいくつかを明らかにした。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

【研究項目 A01】

研究推進時に以下の2件の問題が生じた。

ひとつは、南極ドームふじ基地で予定していた系外惑星トランシットの連続観測である。これは、ドームふじ基地へのアクセスが困難となったことにより、断念せざるを得なかった。

もうひとつは、高コントラスト赤外線分光器 CHARIS 用の分散素子（組合せプリズム）を、より高性能のものに交換したことで生じた工程の遅れである。当初の設計では、波長によって分散が大きく変化するガラス材（BaF₂）しかなかったため、これを用いることとしていた。しかし、研究推進中により良いガラス材（L-BBH2）を使用する可能性が見つかり、これを用いることで広い波長域で同じ分散を得られることが分かった。しかし、L-BBH2 は低温（CHARIS は光学系全体を液体窒素温度に冷却して使用）での物性が不明であったため、実際に冷却実験を行ってその物性を測定し、それを詳細設計に反映するなどした。結果として CHARIS の製作工程に1年以上の遅れが出ることとなった。しかし、CHARIS はすでに完成してハワイ観測所（すばる望遠鏡）に納入されており、2016年7月から試験観測を開始できる予定である。

【研究項目 A02】

研究項目 A01 で予定していた新型分光装置による系外木星型惑星分光データ取得の手前で研究期間が終了した。それを補うために、参照天体としてもっとも重要な木星を対象に、凝縮を伴う対流過程による物質分布の決定機構と惑星スペクトル特性への影響について、実測データの再検討も含めて集中的に研究を進め、来る分光データ解釈の基礎を固めた。

【研究項目 B01】

本研究計画の中核的な研究手段であった ALMA からのデータ提供が、観測運用上の制約から当初予定より約2年遅れた。しかし、第3年度に惑星ギャップ計算を担当する研究員2名（うち1名は1年後に常勤職に転出）、第4年度に ALMA データ解析に習熟した研究者1名を強化し、理論モデル・データ解析両面から事前準備を入念に進めた。その結果、ALMA 超高解像度画像が手に入る段階になって即座に、今後の研究展開を図る上で基盤を与える論文を複数発表することができた。

【研究項目 B02】

B02 班では、観測データも利用しながら、理論研究を主な手法にして研究を遂行した。その研究においては、分担者と本プロジェクトで雇用した研究員とのチーム作りが鍵となった。5年の間には、若手研究者も育ったので、途中で若手を新たな分担者に迎えた。また、研究員が常勤職など別ポストに昇進したりしたので、それに応じて、研究員の入れ替えも行った。問題点は5年の研究期間の残りが少なくなったときに、研究員の欠員が出た時には補充が難しかったことである。対応策としては、予算の繰越をすることで、補充がうまくできた。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<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>

本領域採択時の審査においては、「大変重要な研究課題と考えられ」、「研究領域の大いなる発展が期待される」という所見をいただいた。「審査結果の所見」では、「応募研究経費については、概ね妥当であるが、謝金の割合が著しく高い計画研究項目があり、明確な説明（場合によっては減額）が必要ではないか」という指摘があった。本領域は、新たな領域という言葉どおり、シニアな研究者はまだ少ないが、多くの若手研究者・大学院生が参画したいと希望する研究分野である。そのため、本領域では学位取得後の若手を積極的に雇用して育て、世界に送り出す若手人材育成をひとつの目標とした。これが一部の計画研究で雇用経費（謝金）が高い理由であった。実際にはこれらの経費は減額されたものの、できる範囲内でこの目標を達成すべく、若手を雇用した。

<中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

【研究項目 X 00】

総括班の活動に関しては、中間評価において特に指摘を受けた事項はなかった。

【研究項目 A01】

中間評価では以下の所見をいただいた。「本計画研究の大きな目標は、直接観察と分光である。直接観察については、すばる望遠鏡によるガス惑星の直接撮像観測（SEEDS 計画）は極めて順調に進展している。予定されていた観測時間の 3/4 を終え、惑星として確実なもの一つ、及び多数の原始惑星系円盤の直接撮像などに成功している。一方、ガス惑星の分光については、専用装置の開発が順調に進展し、赤外域の分光器及びその前置補償光学系の設計から組立段階に入りつつある。今後の研究計画の骨子は、SEEDS 計画を 1 年程度で終了し、直接観察によって確定された惑星の広帯域赤外分光を行うこととされている。新装置の惑星検出性能は非常に高く、惑星の本格分光に大きな期待が持てる。MEMS や半導体検出器は日進月歩なので最新の技術を取り入れたものに仕上がることを期待する。研究経費の必要性・妥当性については問題ない。」

このように中間評価において特に指摘を受けた事項はなかった。所見においては、「今後の研究計画の骨子は（中略）、直接観察によって確定された惑星の広帯域赤外分光を行うこととされている。新装置の惑星検出性能は非常に高く、惑星の本格分光に大きな期待が持てる。」との期待が述べられている。この点に関しては、高コントラスト赤外線分光器 CHARIS の製作が遅れたため、現時点において系外惑星の本格分光には着手できていないのが残念である。ただ、前置光学系としての超高次波面補償装置 SCEXAO は完成して試験観測も終了しており、「新装置の惑星検出性能は非常に高」いことは間違いない。今夏に CHARIS の試験観測が終了次第、本格的な分光観測を推進する予定である。

【研究項目 A02】

中間評価では以下の所見をいただいた。「同期回転惑星の 3D 大気シミュレーションによる新知見、惑星集積期以降の惑星表面環境の進化経路に関する理論的検討の Nature 誌への掲載など、成果を上げることが伺える。また、世界初の木星の雲対流の数値シミュレーション、水の散逸率が非常に高いこと、水蒸気大気の射出限界の熱輸送における重要性など、数値計算的な検討が進み、研究期間後半の分光的観測データ解釈への準備が整った。今後は、大気循環数値モデルの改良を進め、系外惑星の大気進化の多様性の解明や循環シミュレーション結果と研究項目 A01 の観測結果の比較検討を行う。また、モデルの様々な要素を一つの大気モデルに組み上げることや、モデルが提供する分光学的な観測可能量と観測データとの突き合わせの段階に入ることが予定されている。これは、本研究領域の最も中心になる課題の一つである。研究経費は PD 雇用費用と地方に分散している拠点間の連携のための旅費より構成されており、特に問題はない。」

このような評価を受け、中間評価後は観測量の予測ならびに解釈の基盤を構築する研究を重点的に進めた。マグマオーシャンを保有する地球型惑星の観測可能性、木星型惑星大気の凝結を伴う大気対流による物質分布の決定機構とその全球スペクトル特性への影響を定量的に明らかにした。同時に大気大循環モデルを、雲放射過程を組み込むなどして高度化し、地球型惑星の気候状態や海洋の安定性を区分する重要素

過程に着目した数値モデル研究を進めた。また大規模大気散逸による大気進化の過程について、循環シミュレーションによる水の安定性の解析結果を併用しつつ明らかにした。研究経費のほとんどは、PD 雇用経費と地理的に分散する拠点間をつなぐ旅費に引き続きに割り当て、密接な共同研究を促進した。

【研究項目 B01】

中間評価では以下の所見をいただいた。「本計画研究は、原始惑星系円盤から惑星が生じる形態的過程及びその間の物質的な変化を、ALMA の観測データをもとに 1AU の分解能で明らかにすることを主な目標としている。ALMA の運用には遅れが出ているが、「すばる」や「あかり」による予備的な観測データは蓄積されつつある。数値計算ではダストから微惑星に至る成長過程のモデルが精緻化され、ダストの不均一分布に関する新しい予想がでるなど、多角的に成果を上げていると言える。今後は、円盤内部の構造や物質分布など、ALMA 観測データの一層の蓄積とこれに呼応する数値シミュレーションのさらなる進化が期待され、モデルの違いが一層はっきりと区別されるようになり、理解の精密化が進むと思われる。また、研究経費は PD 雇用経費が多いが、それらの研究者は研究の推進に不可欠であり、妥当であると考えられる。」

これを受け、中間評価以降、観測との比較を視野に入れた理論モデルの構築で大きな進捗があった。具体的には、観測的に測定可能な惑星ギャップパラメータ（幅や深さ）から惑星質量を预言する理論モデル・シミュレーションや、円盤内ダスト成長モデルの発展である。これらの準備が実を結び、ALMA 高解像度データが提供された際に、惑星質量の推定や、ダストの成長・破壊によって生じうる円盤のグローバルな構造を提起するといった多角的な成果をあげられた。また、ガス化学モデルの精緻化を進め、円盤ガス化学の理解が深まっただけでなく、ALMA 観測で得られた分子種ごとの空間分布の違いを理解する上でも確固とした基礎を与えた。これらにあたっては、研究項目 B02 との連携や、本研究項目で雇用した PD が重要な役割を果たした。これと並行して、基礎物性や実験に基づくダスト付着条件・破壊に伴うダスト供給率の精密化を図ったほか、環境による円盤寿命の違いを明らかにすることができた。

【研究項目 B02】

中間評価では以下の所見をいただいた。「本計画研究は他の研究項目と有機的に連携して、太陽系で成功した惑星形成モデルを系外惑星にも適用することを目的としている。惑星の形成過程を統計的に扱えるような理論的・数値計算的枠組み（population synthesis）を作り、増大する系外惑星の統計的データと理論の橋渡しをすることにより、惑星の多様性を理解することを目指している。これまでに、電磁氣的相互作用を含む色々な相互作用とパラメータの異なる多数のシナリオを検討し、形態や組成などに幅広い多様性があることを示した。すでに多数の論文を出版しており、研究は順調に進展している。今後、これまで用いた手法をより多様な状況、例えば、太陽系のみならず系外惑星系の形成を統一的に説明する理論などに適用できるように拡大することは、観測される系との対比において重要である。また、電磁放射的な性質を計算可能にすることは ALMA のデータ解釈に必須である。これらを含めて今後の研究計画・研究方法及びは妥当であり、研究経費の必要性・妥当性も問題ない。」

これを受け、中間評価以後も観測と結びつく理論的論文を多数発表した。基礎過程の解明に集中した論文においては、「太陽系のみならず系外惑星系の形成を統一的に説明する理論などに適用できるように拡大すること」に留意し、一般的な議論になるように心がけた。一方、ALMA により、惑星形成の母体となる原始惑星系円盤の構造の詳細なデータが得られるようになり、短周期スーパーアースの大気の観測も進展したことで、それらの理論モデルの構築に精力を割いた。ALMA の円盤観測データはダストからの放射を観測しているため、得られた観測データは円盤ガス成分そのものの構造を表している可能性とダスト分布の構造を表している可能性の 2 つがある。われわれは研究項目 B01 との綿密な連携のもとに、原始惑星系円盤内のダストの成長・移動・破壊モデル、すでに形成されている惑星による円盤ガスの構造形成モデル、および円盤からの電波放射モデルの構築を急ぎ、データとの比較検討を行った。また、B01 班と協力して自ら ALMA にプロポーザルを出し、採択され、新しい円盤でも驚くべき構造を発見した。

5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）【研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する】

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

【研究項目 A01】

（1）ガス惑星の直接撮像と地球型惑星の検出

本計画研究によるガス惑星撮像の成果としては、2 個の恒星周囲にそれぞれ 1 個、合計で 2 個の惑星を直接検出したことである。これも含めて、現在までに直接撮像された惑星は、6 個の恒星周囲に 9 個しかない。ひとつは κ And 星に付随する惑星で、質量は木星の 13 倍、表面温度は 1700K、中心星から 55 天文単位離れている。もうひとつは GJ504 星に付随する惑星 GJ504b (図 7-1) で、質量は木星の 4 倍、表面温度は 510K、中心星から 44 天文単位離れている。この惑星は直接撮像された惑星のなかでは最も低質量で低温であり、「第二の木星」と呼ぶにふさわしい（林、藤原）。

また重力マイクロレンズ法による系外惑星の間接検出については、木星型ガス惑星 25 個、海王星型惑星 10 個、地球型惑星 1 個の検出に成功した。これらは図 5-1 に示した点（矢印で示した点）。

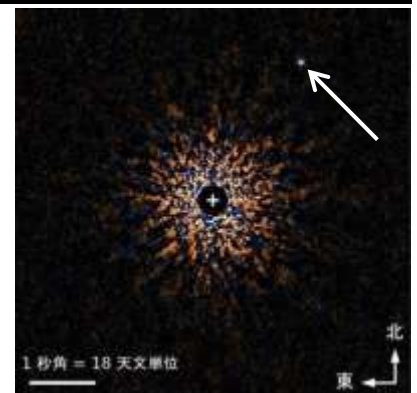


図 5-1 直接撮像した惑星 GJ504b (矢印で示した点)。(Kuzuhara et al. 2013)

（2）分光観測を目的とした高コントラスト装置の開発・製作

すばる望遠鏡に搭載してガス惑星の分光を行うための装置として、高コントラスト赤外線面分光器 (CHARIS) と超高次波面補償光学装置 (SCExAO) の開発・製作を行った（林、高遠）。SCExAO は完成し、前置光学系として本格的な高コントラスト観測に利用されている（図 2-1 参照）。これまでの波面補償光学装置 AO188 を使用した場合に比較して、SCExAO を前置光学系として用いるとコントラストが約 10 倍改善された (Guyon)。またプリンストン大学と共同開発した CHARIS については、2016 年 7 月から試験観測を開始する予定である。

【研究項目 A02】

（1）系外惑星の大気循環と熱収支の解明と予測

片方の半球に中心星放射が固定される同期回転地球型惑星について、雲放射過程の導入など高度化した大気大循環シミュレーションを実施した。その結果、雲による日射の反射により、暴走温室効の発生に必要な日射量が抑制されることを明らかにした。他方、より弱い日射を与えた場合、恒星直下点での高温化と活発な降水により、化学風化による全球炭素固定率が著しく上昇し、大気二酸化炭素濃度が低く抑えられる傾向にあることを見出した。また世界初となる木星型惑星大気における複数の凝結成分を考慮した雲対流モデルの構築と拡張を進め、雲生成の间歇性の原因を明らかにし、大気中の物質分布を定量的に推定した。これらの循環数値モデル群はその最新版をインターネット上に無償公開している

(<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmmodel/>)。(倉本、林、阿部)

（2）系外惑星の大気進化の多様性の解明

巨大衝突による大規模融解後の地球型惑星の大気進化を初めて解明した。結果は、中心星からの距離に応じ、マグマオーシャンに覆われた暴走温室状態が長期間持続する場合と、水蒸気が地表へ凝結し速やかに海洋が形成される場合に大分される。前者の継続時間が紫外線による水蒸気分解・散逸速度に支配されることを示した。また、海洋の安定性や大気組成を制御する重要な素過程である水素散逸過程について、散逸効率が先行研究の推定よりもきわめて高いことを示した。大規模大気散逸によって大気を失うことにより、両極域に液体の水が局在化し、ハビタブルな惑星環境が長期的に維持されるような進化経路が存在することを明らかにした。(阿部、倉本)

（3）系外惑星のキャラクタリゼーションと解釈

木星型惑星大気について、雲対流モデルに加え放射伝達モデルを構築し、雲生成の间歇性、雲対流による物質分布の決定機構、可視・熱放射域それぞれの全球スペクトルを支配する因子を系統的に明らかにした。特に雲が赤外放射に及ぼす影響はよくわかっていなかったが、木星のような低温で放射冷却率の小さな惑星においては、雲粒よりも主成分の H_2 や放射活性な NH_3 、 CH_4 などのガス分子による吸収の効果が卓越する傾向にあることが明らかになった。さらに地球型惑星の巨大衝突後の大気進化モデルに沿って、惑星年齢と中心星からの距離の関数として惑星放射スペクトルを予測し、マグマオーシャン保有惑星と水惑星の観測可能性を定量的に明らかにした。(倉本、はしもと、関根)

【研究項目 B01】

(1) 円盤構造と進化の解明

HD142527 に付随する原始惑星系円盤を ALMA で観測し、中心星から約 150 AU 離れた場所にダスト放射輝度の極めて高い領域を発見した。この領域では、ガスに対するダスト量が星間空間に比べて 30 倍以上濃集していることを明らかにした (図 5-2; 深川、武藤、百瀬、塚越ら)。また、おうし座 HL 星円盤の ALMA による公開画像で見られる溝について、独自の解釈を提唱した。この溝が惑星によって形成された場合には、土星から木星質量の惑星が 3 個存在する可能性を示した (金川、田中、武藤ら)。うみへび座 TW 星の円盤では、一酸化炭素のスノーライン付近に数海王星質量の惑星で説明可能な溝を発見した (B02 との連携; 塚越、武藤ら)。

すばる望遠鏡 SEEDS プロジェクトでは、10 以上の原始惑星系円盤を近赤外線 で観測し、中心星から 100 AU 程度の領域で、ダストによる散乱光の直接撮像に成功した。複数の円盤で、未検出の惑星に起因すると解釈できる溝や非軸対称な構造を検出した (A01 と連携; 武藤、深川、百瀬)。中質量前主系列星の中間赤外線撮像サーベイからは、フレアしている円盤内縁部にはギャップがあることを明らかにした (A01 と連携; 尾中)。赤外線データの統計解析により、銀河系外縁部の低金属量の星団で、同年代の太陽近傍の星団に比して、円盤の存在確率が有意に低いことなどを明らかにした (安井、尾中ら)。

(2) 円盤内固体物質の組成や成長の解明

ダストの成長に関する研究では、成長初期には衝突圧縮が効かず、高空隙率で低密度な氷天体が最初に形成され、その後天体サイズが約 100m 以上になるとガス動圧が、km サイズ以上では自己重力が顕著となり、最終的に密度 0.1g cm^{-3} 以上にまで圧縮されて微惑星が形成されることを初めて明らかにした (研究項目 B02 にも記載; 田中ら)。物性に基づく理論研究では、円盤ダストの結晶化は過冷却状態 (融点よりも十分低温な条件下) で起こることを示し、結晶形態の冷却条件依存性も包括的に調べた (山本ら)。ダスト衝突付着条件や、微惑星等からのダスト放出についても詳しい再検討を行い、今後の原始惑星系円盤や残骸円盤の高解像度観測での検証が期待される (木村、山本ら)。

一方、実験からは、多数回衝突で氷が破壊される場合の衝突破壊強度が、それを積算エネルギー密度で表したときに単発衝突破壊で得た値と一致することがわかった。また石英粒子を用いたクレーター形成実験からイジェクタの速度分布を調べた結果、クレーターの掘削流に対する弾丸潜り込みの効果を定量的に明らかにした (荒川)。これらと密接に関係する成果として、あかり衛星による中間赤外全天サーベイから抽出された残骸円盤の 1 つ (HD15407A) に対する追観測によってシリカの存在を確認し、それが巨大衝突に起因している可能性を指摘した (A01 と協同; 尾中ら)。

(3) 円盤ガス物質の組成や進化の解明

原始惑星系円盤の形成直前段階にあたる原始星について、その中心部 (ファーストコア近傍)、及び外層部を対象にした分子ガス組成計算を行った。地球の海水における HDO と H_2O の比 ($\sim 10^{-4}$) が太陽系近傍での D/H 値より一桁高い事実を説明するため、原始星外層部で観測されている極めて高い HDO/ H_2O 比 ($\sim 10^{-2}$) をもつ水が、原始惑星系円盤に取り込まれた後どのように破壊・再生成されるかをガス化学組成進化計算によって調べた。メタノールなどの大型有機分子の気相と固相での存在度比や、一酸化炭素分子の化学反応による減損を理論的に明らかにした。このうち、 N_2H^+ など円盤内の主要なイオン分子の存在度の解析解を求めた研究は、ALMA での観測結果の解析で用いられている (B02 と協同; 相川)。

【研究項目 B02】

研究項目 B02 では、星・惑星形成プロセスの理論モデルの構築、観測と理論モデルの比較検討、系外地球型惑星の形成進化の理論において成果を出した。

(1) 星惑星形成過程の理論モデルの構築

原始星の形成およびその直後に始まる原始惑星系円盤の形成過程のシナリオを構築した (犬塚ら)。中心星が木星質量程度のときから円盤が形成され、円盤分裂によってガス塊が多数形成されて中心星に落ちて行くという描像が得られ、これは惑星形成の初期条件の考え方を大きく変えた。

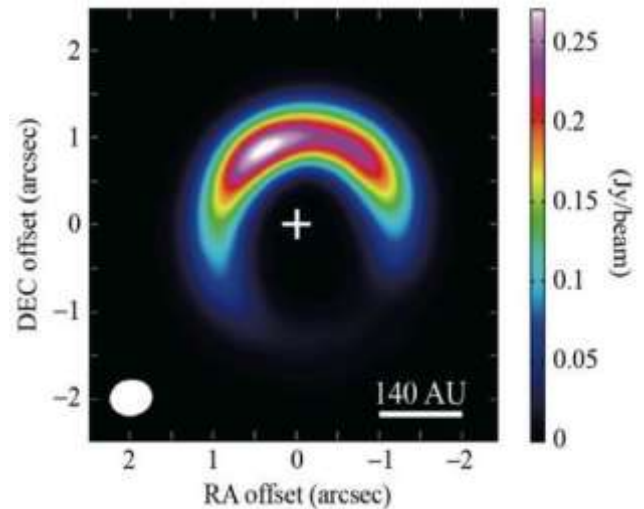


図 5-2 : ALMA によって取得された若い星 HD142527 に付随する原始惑星系円盤のサブミリ波・ダスト連続波イメージ。十字は星の位置を、左下の白い楕円は点源を観測したときに得られる広がり、それぞれ示す。

円盤での磁気回転乱流の強度を支配する大局磁場の長時間進化を、磁場輸送の平均場モデルを用いて詳細に調べ、乱流中でのプラズマの電場加熱を考慮した円盤電離モデルを世界に先駆けて完成させ、プラズマの加熱が円盤外側領域での磁気乱流を安定化させることを示した（犬塚、奥住ら）。

（2）微惑星形成の理論シミュレーションの成功

円盤内のダストの合体成長・空隙率進化・軌道進化を整合的に考慮したダスト進化シミュレーションを実施し、高空隙率化に伴うダストのガス抵抗特性の変化が、氷ダストの急速な合体成長を引き起こし、中心星に落下する前に氷微惑星が形成されることを世界で初めて示した（図 5-3；B01 と連携；奥住ら）。また、新たな小石集積（ペブルアクリーション）モデルにも着目し、小石の形成を明らかにし、小石による地球型惑星への H₂O の輸送過程を明らかにした（奥住、井田ら）。

（3）系外惑星の観測と理論モデルの比較検討

巨大惑星の重力散乱についての N 体シミュレーションとモンテカルロ計算により、系外巨大惑星の軌道の楕円率の分布を見事に説明した（井田、長沢ら）。研究項目 A01 の観測が標的にする中心星から離れた巨大惑星の形成も、標準コア集積モデルで形成できることを示した。系外巨大惑星の重力散乱は、巨大惑星の軌道離心率を上げ、系外への放出も起こすが、それらのはるか内側領域に存在する地球型惑星のほとんども中心星に落とすことを示した（井田、長沢ら）。また、巨大惑星の重力散乱の過程で一定の割合で惑星同士が重力的に束縛されて連惑星となることを明らかにし、トランジット観測における検出可能性を議論した（井田、長沢ら）。

原始惑星による円盤ガス獲得過程を系統的に調べ、それを木星型惑星の起源および短周期スーパーアースの大気の起源に応用した（生駒ら）。微惑星の蒸発によって原始エンベロープが汚染されると、ガス捕獲可能な惑星質量が従来の値に比べて大幅に減少することを発見した（生駒ら）。一方、中心星近くでスーパーアースが獲得できる大気量は、中心星からの距離や円盤ガスの散逸時期によって様々であり、観測が示すスーパーアースのバルク密度の多様性を説明できることを示した。そうした形成理論の妥当性を検証するために、トランジット時の惑星大気透過スペクトルを理論的に予測し、観測提案もおこなった（生駒ら）。

（4）原始惑星系円盤の観測と理論モデルの比較検討

ALMA によって撮像された、原始惑星系円盤のリング構造は非常に大きなインパクトを与えた。研究項目 B01 と連携して、原始惑星系円盤内のダストの成長・移動・焼結による破壊モデル（奥住、野村ほか）、円盤永年重力不安定性（犬塚ほか）、存在している惑星による円盤ガスの構造形成モデル（B01）など多方面から、リング構造の起源を探った。また、他の円盤でも同様の円盤構造を発見した（野村ほか）。

円盤の詳細な化学反応及び輻射輸送計算に基づき、円盤中の有機分子の生成過程と彗星内の有機分子との関連、また、その ALMA による観測可能性を調べた（野村ほか）。また、スノーラインの位置を ALMA や TMT、SPICA を用いた水輝線の観測により求める手法を提案し、実際の観測で氷微粒子（水の氷を多く含むダスト）の存在を確認した（野村、中本ら）。

（5）系外地球型惑星の形成進化の理論モデルの構築

系外地球型惑星の軌道安定性の他にも、衛星の存在が惑星の気候や生命居住可能性にどのような影響を与えるのかに関する一般的モデルの構築を行った（井田、小久保ら）。地球型惑星形成過程の最終段階である巨大衝突によって形成される惑星系の軌道構造がどのように決まるかを多体シミュレーションで調べ、形成される惑星系の軌道間隔と軌道離心率を予測し、生成される衝突破片を定量的に明らかにし、その観測可能性について議論した（小久保）。ハビタブルゾーンに地球型惑星があっても、その温度領域では H₂O は凝縮しないので、外側領域で凝縮した H₂O 氷をどのように惑星に運ぶのが重要である。小石での輸送のほか、巨大ガス惑星による氷微惑星の散乱についても調べた（井田、奥住）。

【公募研究】

将来地球型惑星の直接検出に有望なコロナグラフとして、ナル干渉型コロナグラフの実験で 3×10^{-7} のコントラストを達成した（村上）。惑星大気に関する研究では、木星や土星に見られる低緯度のジェット気流などを理論的に再現することに成功した（竹広）。惑星系形成・原始惑星系円盤に関する研究では、微惑星が作る衝撃波によって氷微惑星が蒸発し、大量の微小ダスト粒子を原始惑星系円盤内に放出するという新たなメカニズムを提案し、これが原始惑星系円盤内で長いタイムスケールにわたって観測される赤外線スペクトルの超過を説明する可能性を示した（田中）。また、3次元高解像度数値流体シミュレーションの結果、原始惑星系円盤から周惑星円盤へのガス降着流は円盤中心面からはおこらず、円盤の上下方向から周惑星円盤表面に降着することが明らかとなった（谷川）。

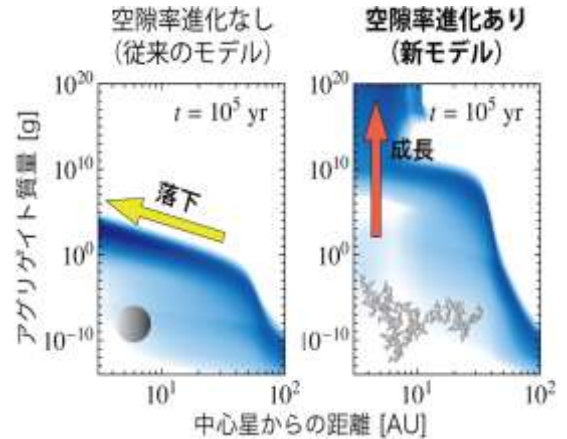


図 5-3：氷ダストの成長の数値計算

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

【主な論文一覧：研究項目 A01】

- *ALMA Partnership, ... Hayashi, M., ..., 2015, The 2014 ALMA Long Baseline Campaign: An Overview, *Astrophys. J. Letters*, 808, L1
- *de Leon, J., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2015, Near-IR High-resolution Imaging Polarimetry of the SU Aur Disk: Clues for Tidal Tails?, *Astrophys. J. Letters*, 806, L10
- ▲*Fukui, A., ... Sumi, T., ..., 2015, OGLE-2012-BLG-0563Lb: A Saturn-mass Planet around an M Dwarf with the Mass Constrained by Subaru AO Imaging, *Astrophys. J.*, 809, 74
- ▲*Calchi Novati, S., ... Sumi, T., ... , 2015, Pathway to the Galactic Distribution of Planets: Combined Spitzer and Ground-Based Microlens Parallax Measurements of 21 Single-Lens Events, *Astrophys. J.*, 804, 20
- *Honda, M., ... Sakon, I., ..., 2015, High-resolution 25 M Imaging of the Disks around Herbig Ae/Be Stars: A Link between the Progenitor and the Mass Loss, *Astrophys. J.*, 804, 143
- *Brandt, T., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2014, A Statistical Analysis of SEEDS and Other High-contrast Exoplanet Surveys: Massive Planets or Low-mass Brown Dwarfs?, *Astrophys. J.*, 794, 159
- *Brandt, T., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2014, The Moving Group Targets of the SEEDS High-contrast Imaging Survey of Exoplanets and Disks: Results and Observations from the First Three Years, *Astrophys. J.*, 786, 1
- ▲*Kuzuhara, M., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2013, Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around the Sun-like Star GJ 504, *Astrophys. J.*, 774, 1
- *Guyon, O., ... (全 15 名), 2013, Simultaneous Exoplanet Characterization and Deep Wide-field Imaging with a Diffractive Pupil Telescope, *Astrophys. J.*, *ApJ*, 767, 11
- *Carson, J., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2013, Direct Imaging Discovery of a "Super-Jupiter" around the Late B-type Star κ And, *Astrophys. J.*, Letter, 763, L32
- *Thalmann, C., ..., Momose, M., ..., Hayashi, M., ..., 2013, Imaging Discovery of the Debris Disk around HIP 79977, *Astrophys. J.*, Letters, 763, L29
- ▲*Grady, C. A., ..., Hayashi, M., ..., 2013, Spiral Arms in the Asymmetrically Illuminated Disk of MWC 758 and Constraints on Giant Planets, *Astrophys. J.*, 762, 48
- *Street, R. A., ..., Sumi, T., ..., 2013, MOA-2010-BLG-073L: An M-dwarf with a Substellar Companion at the Planet/Brown Dwarf Boundary, *Astrophys. J.*, 763, 67
- ▲*Mayama, S., ..., Hayashi, M., ..., 2012, Subaru Imaging of Asymmetric Features in a Transitional Disk in Upper Scorpius, *Astrophys. J.*, Letters, 760, L26
- *Dong, R., ...Guyon, O., ...Hayashi, M., ...Takato, N., ..., 2012, The Structure of Pre-transitional Protoplanetary Disks. I. Radiative Transfer Modeling of the Disk+Cavity in the PDS 70 System, *Astrophys. J.*, 760, 111
- *Hashimoto, J., ..., Hayashi, M., Takato, N., ..., 2012, Polarimetric Imaging of Large Cavity Structures in the Pre-transitional Protoplanetary Disk around PDS 70: Observations of the Disk, *Astrophys. J.*, Letters, 758, L19
- ▲*Kusakabe, N., ..., Hayashi, M., Takato, N., ..., 2012, High-contrast Near-infrared Polarization Imaging of MWC480, *Astrophys. J.*, 753, 153
- ▲*Muto, T., ...Guyon, O., ...Hayashi, M., ...Takato, N., ..., 2012, Discovery of Small-scale Spiral Structures in the Disk of SAO 206462 (HD 135344B): Implications for the Physical State of the

Disk from Spiral Density Wave Theory, *Astrophys. J., Letters*, 748, L22

- *Martinache, F., Guyon, O., Clergeon, C., Blain, C., 2012, Speckle Control with a Remapped-Pupil PIAA Coronagraph, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 124, 1288
- *Garrel, V., Guyon, O., Baudoz, P. A., 2012, Highly Efficient Lucky Imaging Algorithm: Image Synthesis Based on Fourier Amplitude Selection, *Pub. of the Astron. Soc. of the Pacific*, 124, 861
- *Guyon, O., ..., 2012, High-precision Astrometry with a Diffractive Pupil Telescope, *Astrophys. J., Supplement*, 200, 11
- *Dong, R., ..., Guyon, O. ..., Hayashi, M. ..., Takato, N. ..., 2012, The Missing Cavities in the SEEDS Polarized Scattered Light Images of Transitional Protoplanetary Disks: A Generic Disk Model, *Astrophys. J.*, 750, 161
- *Kubas, D., ..., Sumi, T., ..., 2012, A frozen super-Earth orbiting a star at the bottom of the main sequence, *Astron & Astrophys*, 540, A78
- *Cassan, A., ... Sumi, T., ... , 2012, One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations, *Nature*, 481, 167

【主な論文一覧：計画研究 A02】

- ▲*Yamashita, T., Ph.D, Odaka, M., Sugiyama, K., Nakajima, K., Ishiwatari, M., Nishizawa, Takahashi, Y. O., and Hayashi, Y.-Y., A numerical study on convection of a condensing CO₂ atmosphere under early Mars like conditions *Journal of Atmospheric Science*, in press.
- ▲*Kodama, T., Genda, H., Abe, Y., and Zahnle, K. J., 2015, Rapid Water Loss Can Extend the Lifetime of Planetary Habitability, *Astrophys. J.*, 812, 165
- ▲*Hamano, K., Kawahara, H., Abe, Y., Onishi, M., and Hashimoto, G. L., 2015, Lifetime and Spectral Evolution of a Magma Ocean with a Steam Atmosphere: Its Detectability by Future Direct Imaging, *Astrophys. J.*, 806, 216
- ▲*Harada, M., Tajika, E., and Sekine, Y., 2015, Transition to an oxygen-rich atmosphere with an extensive overshoot triggered by the Paleoproterozoic snowball Earth, *Earth and Planetary Science Letters*, 419, 178
- *Tsumura, K., ..., Kuramoto, K., ..., 2014, Near-infrared Brightness of the Galilean Satellites Eclipsed in Jovian Shadow: A New Technique to Investigate Jovian Upper Atmosphere, *Astrophys. J.*, Volume 789, 492
- ▲*Sugiyama, K., Nakajima, K., Odaka, M., Kuramoto, K., and Hayashi, Y.-Y. 2014, Numerical simulations of Jupiter's moist convection layer: Structure and dynamics in statistically steady states, *Icarus*, 229, 71
- ▲*Sekine, Y., Genda, H., Muto, Y., Sugita, S., Kadono, T., and Matsui, T., 2014, Impact chemistry of methanol: Implications for volatile evolution on icy satellites and dwarf planets, and cometary delivery to the Moon, *Icarus*, 243, 39
- *Marti, P., Schaeffer, N., Hollerbach, R., Cébron, D., Nore, C., Luddens, F., Guermond, J.-L., Aubert, J., Takehiro, S., Sasaki, Y., Hayashi, Y.-Y., ..., 2014, Full sphere hydrodynamic and dynamo benchmarks, *Geophysical Journal International*, 197, 119
- ▲*Hamano, K., Abe, Y., and Genda, H., 2013, Emergence of two types of terrestrial planet on solidification of magma ocean, *Nature*, 497, 607
- ▲*Kuramoto, K., Umemoto, T., and Ishiwatari, M., 2013, Effective hydrodynamic hydrogen escape from an early Earth atmosphere inferred from high-accuracy numerical simulation, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 375, 312
- *Nakajima, K., Yamada, Y., Takahashi, Y. O., Ishiwatari, M., Ohfuchi, W., and Hayashi, Y. Y. , 2013, The Variety of Forced Atmospheric Structure in Response to Tropical SST Anomaly in the Aqua-Planet Experiments. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 91A, 143
- ▲*Kurosawa, K., Sugita, S., Ishibashi, K., Hasegawa, S., Sekine, Y., Ogawa, N. O.,..., & Matsui, T., 2013, Hydrogen cyanide production due to mid-size impacts in a redox-neutral N₂-rich atmosphere, *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 43, 221
- *Ishiwatari, M., Toyoda, E., Morikawa, Y., Takehiro, S., Sasaki, Y., Nishizawa, S., Odaka, M., Otobe, N., Takahashi, Y. O., Nakajima, K., Horinouchi, T., Shiotani, M., Hayashi, Y. -Y. & Gtool development group, 2012, "Gtool5": a Fortran90 library of input/output interfaces for self-descriptive multi-dimensional numerical data, *Geosci. Model Dev.*, 5, 449

【主な論文一覧：研究項目 B01】

- ▲*Tazaki, R., Tanaka, H., Okuzumi, S., Kataoka, A. & Nomura, H. 2016, Light scattering by fractal dust aggregates: I. Angular dependence of scattering, ApJ in press
- ▲*Kataoka, A., Muto, T., Momose, M., Tsukagoshi, T., & Dullemond, C. P. 2016, Grain Size Constraints on HL Tau with Polarization Signature, ApJ, 820, 54
- *Yasui, C., Kobayashi, N., Hamano, S., Tokunaga, A. T., Saito, M. & Kondo, S. 2016, Herbig Ae/Be candidate stars in the innermost Galactic disk: Quartet cluster, ApJ, 817, 181
- ▲* Muto, T., Tsukagoshi, T., Momose, M., Hanawa, T., Nomura, H., Fukagawa, M., Saigo, K., Kataoka, A., Kitamura, Y., Takahashi, S.Z., Inutsuka, S., Takeuchi, T., Kobayashi, H., Akiyama, E., Honda, M., Fujiwara, H., & Shibai H., 2015, Significant gas-to-dust ratio asymmetry and variation in the disk of HD 142527 and the indication of gas depletion, Publ. Astron. Soc. Japan, 67, 122
- *Ohsawa, R., Onaka, T. & Yasui, C. 2015, Impact of the initial disk mass function on the disk fraction, PASJ, 67, 120
- ▲*Momose, M., Morita, A., Fukagawa, M., Muto, T., Tanaka, H., ... 2015, Detailed structure of the outer disk around HD 169142 with polarized light in H-band, PASJ 67, 83
- ▲*Kataoka, A., Muto, T., Momose, M., Tsukagoshi, T., Fukagawa, M., Shibai, H., Hanawa, T., Murakawa K. & Dullemond, C. P. 2015, Millimeter-wave Polarization of Protoplanetary Disks due to Dust Scattering, ApJ, 809, 78
- ▲*Kanagawa, K. D., Muto, T., Tanaka, H., Tanigawa, T., Takeuchi, T., Tsukagoshi, T. & Momose, M., 2015, Mass Estimates of a Giant Planet in a Protoplanetary Disk from the Gap Structures, ApJL, 806, L15
- ▲*Aikawa, Y., Furuya, K., Nomura, H., Qi, C. 2015, Analytical Formulae of Molecular Ion Abundances and the N₂H⁺ Ring in Protoplanetary Disks, ApJ, 807, 120
- ▲*Tsukagoshi, T., Momose, M., Saito, M., Kitamura, Y., Shimajiri, Y. & Kawabe, R. 2015, First Detection of [C I] 3P₁ - 3P₀ Emission from a Protoplanetary Disk, ApJL, 802, L7
- *Yasui, C., Kobayashi, N., Tokunaga, A. T. & Saito, M. 2014, Rapid evolution of the innermost dust disc of protoplanetary discs surrounding intermediate-mass stars”, MNRAS, 442, 2543-2559
- ▲*Yamamoto, T., Kadono, T. & Wada, K. 2014, An examination of collisional growth of silicate dust in protoplanetary disks, Astrophys. J. Letters, 783, L36
- *Kimura, H. 2014, The organic-rich carbonaceous component of dust aggregates in circumstellar disks: Effects of its carbonization on infrared spectral features of its magnesium-rich olivine counterpart, Icarus, 232, 133
- ▲*Yasui, M., Hayama, R. & Arakawa, M. 2014, Impact strength of small icy bodies that experienced multiple collisions, Icarus 233, 293
- ▲*Furuya, K. & Aikawa, Y., 2014, Reprocessing of Ices in Turbulent Protoplanetary Disks: Carbon and Nitrogen Chemistry, Astrophys. J., 790, 97
- ▲*Tsukagoshi, T., Momose, M., ... ,2014, High-resolution Submillimeter and Near-infrared Studies of the Transition Disk around Sz 91, Astrophys. J., 783, 90
- ▲*Fukagawa, M., Tsukagoshi, T., Momose, M., Muto, T., ..., 2013, Local Enhancement of the Surface Density in the Protoplanetary Ring Surrounding HD 142527, PASJ, 65, L14
- ▲*Furuya, K., Aikawa, Y., Nomura, H., Hersant, F., Wakelam, V. 2013, Water in Protoplanetary Disks: Deuteration and turbulent mixing, Astrophys. J., 779, 11-29
- ▲*Tanaka, K.K., Yamamoto, T., Tanaka, H., Miura, H., Nagasawa, M. & Nakamoto, T. 2013, Evaporation of Icy planetesimals due to planetesimal bow shock, Astrophys. J., 764, 120
- ▲*Wada, K., Tanaka, H., Okuzumi, S., Kobayashi, H., Suyama, T., Kimura, H., & Yamamoto, T. 2013, Growth efficiency of dust aggregates through collisions with high mass ratios, Astronomy and Astrophysics, 559, A62
- *Kataoka, A., Tanaka, H., Okuzumi S. & Wada, K. 2013, Static compression of porous dust aggregates, Astronomy & Astrophysics, 554, A4

【主な論文一覧：研究項目 B02】

- ▲*Ida, S., Guillot, T. & Morbidelli, A., 2016, The radial dependence of pebble accretion rates: A source of diversity in planetary systems. I. Analytical formulation, Astronomy & Astrophysics, in press
- ▲*Sato, T., Okuzumi, S., Ida, S., 2016, On the water delivery to terrestrial embryos by ice pebble

- accretion, *Astronomy & Astrophysics*, 589, A15
- ▲*Shibaike, Y., Sasaki, T. & Ida, S., 2016, Excavation and Melting of the Hadean Continental Crust by Late Heavy Bombardment, *Icarus*, 266, 89
- *Okuzumi, S., ..., 2016, Sintering-induced Dust Ring Formation in Protoplanetary Disks: Application to the HL Tau Disk, *The Astrophysical J.*, 821, 82
- *Honda, M., ..., Nakamoto, T. ..., 2016, Water Ice at the Surface of HD 100546 Disk, *Astrophys. J.*, 821, 2
- *Miyake, T., Suzuki, T. K. & Inutsuka, S., 2016, Dust Dynamics in Protoplanetary Disk Winds Driven by Magneto-Rotational Turbulence: A Mechanism for Floating Dust Grains with Characteristic Size, *Astrophys. J.*, 821, 3
- *Nomura, H., Tsukagoshi, T., Kawabe, R., Ishimoto, D., Okuzumi, S., Muto, T., Kanagawa, K.D., Ida, S., Walsh, C., Millar, T.J.; Bai, X.-N., 2016, ALMA Observations of a Gap and a Ring in the Protoplanetary Disk around TW Hya, *Astrophys. J. Letters*, 819, L7
- ◎*Mori, S., Okuzumi, S., 2016, Electron Heating in Magnetorotational Instability: Implications for Turbulence Strength in the Outer Regions of Protoplanetary Disks, *The Astrophysical J.*, 817, 52
- *Tomida, K., Okuzumi, S., Machida, M., 2015, Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Protostellar Collapse: Non-ideal Magnetohydrodynamic Effects and Early Formation of Circumstellar Disks, *Astrophys. J.*, 801, 117
- ◎*Okuzumi, S., Inutsuka, S., 2015, The Nonlinear Ohm's Law: Plasma Heating by Strong Electric Fields and its Effects on the Ionization Balance in Protoplanetary Disks, *Astrophys. J.*, 800, 47
- ▲*Matsumoto, Y., Nagasawa, M., Ida, S. 2015, Eccentricity Evolution Through Accretion of Protoplanets, *Astrophys. J.*, 810, 106
- ▲*Lewis, K. M., Ochiai, H., Nagasawa, M., Ida, S., 2015, Extrasolar Binary Planets II: Detectability by Transit Observations, *Astrophys. J.*, 805, 27
- ◎▲*Tian, F. & Ida, S. Water contents of Earth-mass planets around M dwarfs, *Nature Geoscience*, 8, 177
- *Ogihara, M., Kobayashi, H., Inutsuka, S. & Suzuki, T. K., 2015, Formation of terrestrial planets in disks evolving via disk winds and implications for the origin of the solar system's terrestrial planets, *Astronomy & Astrophysics*, 579, A65
- *Tanaka, Y., Suzuki, T. K. & Inutsuka, S. 2015, Atmospheric Escape by Magnetically Driven Wind from Gaseous Planets. II. Effects of Magnetic Diffusion, *Astrophys. J.*, 809, 125
- *Genda, H., Kobayashi, H., Kokubo, E., 2015, Warm Debris Disks Produced by Giant Impacts during Terrestrial Planet Formation, *Astrophys. J.*, 810, 136
- ▲*Kikuchi, A., Higuchi, A., Ida, S., 2014, Orbital Circularization of a Planet Accreting Disk Gas: The Formation of Distant J.,upiters in Circular Orbits Based on a Core Accretion Model, *Astrophys. J.*, 797, 1,
- *Guillot, T., Ida, S. & Ormel, C. W. 2014 On the filtering and processing of dust by planetesimals. I. Derivation of collision probabilities for non-drifting planetesimals, *Astronomy & Astrophysics*, 572, A72
- *Brasser, R., Ida, S. & Kokubo, E. 2014, A dynamical study on the habitability of terrestrial exoplanets - II The super-Earth HD 40307g. *Mon. Not. Royal Astron. Soc.*, 440, 3685
- ▲*Ochiai, H., Nagasawa, M. & Ida, S., 2014, Extrasolar Binary Planets. I. Formation by Tidal Capture during Planet-Planet Scattering, *Astrophys. J.*, 790, 92
- *Kurosaki, K., Ikoma, M., Hori, Y., 2014, Impact of photo-evaporative mass loss on masses and radii of water-rich sub/super-Earths, *Astronomy & Astrophysics*, 562, A80
- *Walsh, C., Millar, T.J., Nomura, H., Herbst, E., Widicus Weaver, S., Aikawa, Y., Laas, J., .C., Vasyunin, A.I., 2014, Complex organic molecules in protoplanetary disks, *Astron & Astrophys*, 56, A33
- ▲*Ida, S., Lin, D. N. C. & Nagasawa, M., 2013, Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. VII. Eccentricity Distribution of Gas Giants, *Astrophys. J.*, 775, 42,

【主な論文一覧：公募研究】

- *Nishiyama, S. and Schödel, R., 2013, Young, Massive Star Candidates Detected throughout the Nuclear Star Cluster of the Milky Way, *Astron. and Astrophys*, 549, A57

- ▲*Nishiyama, S., et al., 2013, "Magnetically Confined Interstellar Hot Plasma in the Nuclear Bulge of Our Galaxy", *Astrophys. J.*, 769, L28
- ▲*Tanaka, K.K., Yamamoto, T., Miura, H., Nagasawa, M., Nakamoto, T., and Tanaka, H., 2013, Evaporation of Icy Planetesimals due to Bow Shocks, *Astrophys. J.*, 764, 120
- *Murakami, N., Kida, M., Baba, N., Matsuo, T., Kotani, T., Kawahara, H., Fujii, Y., Tamura, M., 2012, Development of the Savart-plate lateral-shearing interferometric nuller for exoplanet (SPLINE), *Proceedings of the SPIE*, 8446, 84468H-1--84468H-8
- *Sasaki, E., Takehiro, S., Yamada, M., 2012, A note on the stability of inviscid zonal Jet flows on a rotating sphere, *J. Fluid Mech.*, 710, 154
- *木村勇氣, 稲富祐光, 田中今日子, 真木孝雄, 三浦均, 左近樹, 野沢貴也, 塚本勝男, 2012, 「微小重力環境利用に向けた宇宙ダスト生成のその場観測実験」, *日本結晶学会誌*, 39, 68--74
- *Tanigawa, T., Ohtsuki, K., Machida, M. N., 2012, Distribution of Accreting Gas and Angular Momentum onto Circumplanetary Disks, *Astrophys. J.*, 747, 47
- ▲*Muranushi, T., Okuzumi, S., Inutsuka, S., 2012, Interdependence of Electric Discharge and Magnetorotational Instability in Protoplanetary Disks, *Astrophys. J.*, 760, 56

【書籍】

- 阿部豊、「生命の星の条件を探る」、文芸春秋 2015
- 井田茂、中本泰史、「惑星形成の物理」、共立出版、2015年
- 井田茂、長沼毅、「地球外生命」、岩波新書、2014年
- 小久保英一郎、嶺重慎、「宇宙と生命の起源 2 - 素粒子から細胞へ」、岩波書店、2014
- 井田茂、「系外惑星 - 宇宙と生命のナゾを解く」、ちくまプリマー新書、2012年

【主催シンポジウム】

- Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II、平成25年12月8日(日)～12日(木)、シェラトンコナリゾート&スパ、ハワイ、米国
- 系外惑星大研究会、平成27年3月2日(月)～3日(火)、東京大学情報学環(本郷キャンパス)
- Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III、平成28年2月20日(土)～24日(水)、日航ホテル、石垣島、沖縄県

【ホームページ】

<http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/index.php> (本領域のホームページ)

【一般向けのアウトリーチ活動】

- 尾中敬、WEB発表、「宇宙の氷」で大マゼラン雲を探る～天の川銀河との違いが明らかに～、東京大学 HP 2016年
- 井田茂、対談、井田茂×東浩紀「系外惑星から考える——太陽系は唯一の可能性か」、2015年
- 井田茂、監修、モーガン・フリーマン 時空を越えて「第1回 宇宙人との遭遇 そのとき人類は」、2015年
- 阿部豊、TV出演、おはよう日本、NHK総合、2015年9月3日
- 林正彦、WEB発表、重い恒星の巨大な惑星、すばる望遠鏡が直接観測で発見 国立天文台 HP、2014年
- 深川美里、WEB発表、アルマ望遠鏡が見つけた巨大惑星系形成の現場、国立天文台 HP、2014年
- 武藤恭之、TV出演、スパイラル・ミステリー 5つの渦がひもとく宇宙の謎、NHK BS2 コズミックフロント、2014年5月8日放送
- 小久保英一郎、雑誌取材、宇宙の「素朴な謎」に迫る5つの質問 三浦しをん VS. 小久保英一郎、週刊朝日、2014年1月24日号
- 武藤恭之、WEB発表、太陽系外惑星が作る「腕」の検出に成功、国立天文台 HP、2013年
- 小久保英一郎、TV出演、NHK 高校講座地学基礎、NHK教育、2013年5月15日
- 小久保英一郎、TV出演、探検バクモン、NHK教育、2013年9月1日
- 百瀬宗武、WEB発表、形成しつつある惑星の兆候を捉えた—すばる望遠鏡による新たな発見、茨城大学 HP、2012年
- 倉本圭、一般講演、市民講座：『地球惑星学入門』 NHK文化センター新札幌校：『楽しく学ぶ宇宙と惑星学』、道新文化センター札幌校、月一回開講、2011年から継続中

7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

本領域では、右図のように4件の計画研究を設定しており、それぞれがひとつひとつの研究項目に対応し、研究代表者のもとに組織化されている。また、公募研究もこれに対応して各計画研究ごとに配置した。

4件の研究項目（計画研究）は、

A01: 系外惑星の観測研究

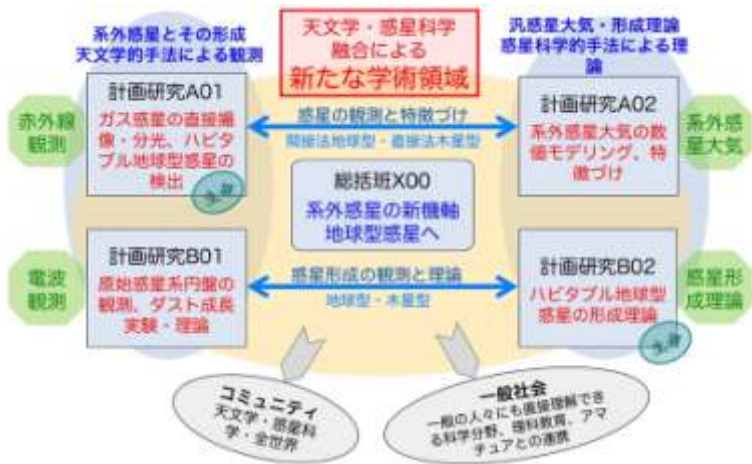
A02: 惑星大気モデリング研究

B01: 惑星系形成の観測研究

B02: 惑星系形成の理論研究

からなっており、これらの相互関係は明確である。すなわち、系外惑星本体の研究と惑星

系形成の研究という2項目に対して、それぞれの観測及び理論という形で4件をなしている。そのため、各研究項目において研究が深く掘り下げられると同時に、必然的にこれらの項目間で活発な連携が行われるという組織となっている。実際、以下で具体的に述べるように、これらの項目間では盛んに研究連携が行われた。また総括班では年1回の領域大研究会（うち2回は国際会議）を開催することで、本領域の参加者及び興味を持つ内外の研究者に対して、公募研究も含めた領域全体の研究の進展を俯瞰し、連携を促進する機会を設けた。



【研究項目A01】

研究項目A01で用いた直接撮像法では、中心星から数十天文単位の距離にあるガス惑星を2例検出した。これは、ドップラー法やトランジット法などの間接的惑星検出法が、中心星に近い惑星を選択的に検出するバイアスがあるのに対し、直接撮像法は中心星から離れた惑星を選択的に検出するバイアスがあるためである。このため、この2例の直接検出も含めて、木星の数倍から十倍程度の質量をもつ惑星がいくつも発見されるに至り、研究項目B02で進めている惑星系の形成理論との連携が進んだ。具体的には、このようなガス惑星の起源として、中心星近傍でコア集積によって形成されたガス惑星が、重力散乱の結果数十天文単位の遠方に飛ばされた可能性があることが研究項目B02によって示された。

また、赤外線による直接撮像法では若い星の周囲に円盤が検出されることが多いが、この点で研究項目B01とは常時相補的な連携関係のもとで研究を実施した。

なお、期間中には高コントラスト赤外線面分光器を用いた実際の観測には至らなかったが、これは同装置のプリズム材料としてより高性能なものを使用する判断をしたことによって、工程が遅れたためである。新たなプリズム材は、近赤外線の広い波長域にわたって均質な分散を有するため、当初の設計に比較してより高品質の分光データを得られる予定であり、研究項目A02のモデリング結果との精密な比較が、当初の想定以上のレベルで可能となる。

【研究項目A02】

研究項目A01の目指す中心的観測対象である小質量星周りの同期回転惑星のハビタビリティ、木星型惑星の大気構造・ダイナミクスと分光スペクトルの関係等について重点的にモデリング研究を進め、観測量の予測を行った。またB01およびB02が明らかにした惑星形成論の最新の描像を反映し、大気形成と進化のモデリングを進めた。公募研究には木星型惑星の深部対流に関するテーマを採択し、大気モデリングの強化を図った。

【研究項目B01】

研究項目B01はALMAによる原始惑星系円盤の高解像度観測を中核に据え、それと関連する赤外線観測、ダストの理論・実験、ガス化学モデリングを広く束ねた体制をとった。研究全般で研究項目B02と連

携し、また赤外線観測では研究項目 A01 と連携しつつ、本研究項目では特に ALMA によるデータから得られる情報を効率良く抽出し、最新理論モデルの観測データへの素早い適用を可能とする役割を担った。これら ALMA やすばるの高解像度観測で得られた原始惑星系円盤の詳細構造に関する情報は、他の研究項目に速やかに提供した。結果的に、円盤中に惑星が作るギャップ構造や HL Tau 円盤でのリング構造の起源などで多くの論文を発表した他、B02 が研究対象とする系外惑星系の多様な姿や、A01 や A02 がメインテーマとする系外惑星大気の起源をさらに深く理解していくための、重要な手がかりを与えた。

研究項目 B01 の企画によって、研究交流の場において、電波観測になじみのない理論・実験研究者を対象にしたデータ解析講習会を実施した。一例は、平成 26 年度の北大低温研・共同研究集会「ALMA を活用した原始惑星系円盤に関する研究の新展開」である。このような機会を通じて、他の研究項目や計画研究の当事者との交流を促進するだけでなく、天文観測データの正しい取り扱い方の習得や、手法が異なる研究者間のコミュニケーション促進に大いに貢献した。

【研究項目 B02】

研究項目 B02 は惑星形成理論、理論モデリングを主題としており、急速に進展する観測を通して、他の研究項目と連携した。

原始惑星系円盤については、ALMA によって撮像された原始惑星系円盤 (HL Tau) の驚きのリング構造に対して、研究項目 B02 と共同で、その構造の起源を多角的に議論し、原始惑星系円盤内のダストの成長・移動・焼結による破壊モデル、円盤永年重力不安定性、存在している惑星による円盤ガスの構造形成などの論文を何本も発表した。また、さらに研究項目 B01 と共同で ALMA に観測プロポーザルを出して採択され、他の円盤でも同様の円盤構造を発見した。

他にも、円盤の詳細な化学反応及び輻射輸送計算による、円盤中の有機分子の生成過程と彗星内の有機分子との関連や、その ALMA による観測可能性の議論や、スノーラインの位置を ALMA や TMT、SPICA を用いた水輝線の観測により求める議論なども、研究項目 B01 と密接に連携して実施した。

また短周期スーパーアースの大気の観測も進み、地球型惑星大気のモデリングも精力的に行い、トランジット惑星に対して岡山観測所で大気の透過分光観測も行った。この研究および、ハビタビリティの議論を研究項目 A02 と行った。研究項目 A01 とは、ホット・ジュピターの形成を引き起こす巨大ガス惑星の重力散乱の結果として、遠方に散乱される巨大ガス惑星もあることを示し、それを予測することで、直接観測の指針をたてる議論で協力した。

8. 研究経費の使用状況(設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む。)(1ページ以内)

領域研究を行う上で設備等(研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など)の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください(総括班における設備共用等への取組の状況を含む。)

【総括班研究課題X00】

領域全体の円滑な運営を行うため、事務支援員1名を雇用して東京大学に配置している。それ以外の経費の大部分は、本領域が主催・共催する国際研究会の開催経費等に使用した。また、特に若手研究者に優先的に旅費を補助して成果発表の場を提供するなど、若手が研究交流を図れる機会を増加させるために研究費を効果的に役立てている。

【研究項目A01】

研究費の大部分は、高コントラスト観測装置の開発・製作に使用している。これには、前置光学系としての超高次波面補償光学装置 SCExAO と、赤外線面分光器 CHARIS が含まれる。SCExAO は国立天文台ハワイ観測所にて、研究分担者の Guyon を中心に開発し、完成している。また CHARIS は、プリンストン大学との共同研究として開発し、平成28年5月の時点でハワイ観測所に納入されており、この7月から観測に供する予定である。

また、SCExAO の開発や重力マイクロレンズ法による低質量惑星の間接検出観測においては、それぞれ研究員として若手を雇用した。

【研究項目A02】

研究経費のほとんどを、PD 雇用経費と地理的に分散する拠点間をつなぐ旅費に割り当て、密接な共同研究を促進した。エアロゾル生成・分光実験装置によるデータは、惑星大気のモデリングに反映されている。大容量ディスクは、大気大循環シミュレーション等の大規模数値計算のデータ格納に用いている。

【研究項目B01】

神戸大学においては、二段式軽ガス加速装置とこの装置の試料チャンパー全体を -15°C の氷点下に冷却するウォークイン型プレハブ式冷凍室を導入した。複数回の衝突を経た氷小天体の衝突破壊強度や、砕屑岩構造を持つラブルパイル天体の衝突破壊強度を決定する成果を得た。東京大学においては、中間赤外線分光装置に必要な高次の回折光を除去する干渉フィルター及び波長を分けるビームスプリッタの開発を行った。これら素子の極低温における波長感度特性の測定を行い、目標とする仕様値を満たす光学素子の製作を行い、将来の地上あるいは衛星望遠鏡搭載観測装置開発につながる基礎技術を確認する成果を得た。大阪大学・宇宙科学研究所にてモニター観測用に開発した可視・近赤外同時撮像カメラは、研究期間内にファーストライトを迎えた。惑星形成の兆候が見られる原始惑星系円盤について、地球型惑星の形成が期待される内側領域のモニター観測を数年に渡って遂行し、一部の結果は ALMA 観測立案に活用した。また、系外惑星のトランジット観測にも使用した。北海道大学に導入した並列計算機コンピュータクラスター、及び茨城大学に導入したハイパフォーマンスコンピュータは、それぞれ、ダスト付着モデル数値実験や ALMA データ解析の中核的設備として活用された。

【研究項目B02】

研究項目 B02 の主な研究手法は、計算機シミュレーションを使った理論研究である。研究費の大半は、若手研究者の雇用および大学院生を含む若手研究者の旅費といった若手育成、国際共同研究促進のための研究代表者および研究分担者の海外渡航旅費に使用した。個人個人の研究者の旅費だけではなく、国際研究集会や合宿研究会を主催するための旅費として有効活用した。

その成果は、160編以上の国際ジャーナルへの論文発表として現れている。海外研究者との共同研究による理論の論文も多数あり、観測プロジェクトに理論研究者として参加した論文も多く、国際共同研究の推進、観測チームとの共同は順調に進んだ。

設備は、2011 年度に名古屋大学に設置した PC クラスター(リアルコンピューティング社製)と国立天文台に設置した重力多体問題専用計算機 GRAPE シリーズの最新機 GRAPE-9 であり、理論研究を支えた。

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。) について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
2 3	高コントラスト分光器概念設計一式	プリンストン大学 (特注品)	1	20,312,467	20,312,467	国立天文台 ハワイ観測所
	プレハブ冷凍室 (島津理化 SLR)	SLR030TS-UNI-SP	1	10,972,500	10,972,500	神戸大学
	近赤外線カメラ (Xenics 社製)	XEVA-CL-EPA-MCT-2.5-320-TE4	1	8,568,000	8,568,000	大阪大学
	可視・赤外分割用冷却ユニット	CDM121029-01A	1	4,567,500	4,567,500	大阪大学
	PowerServer	一式	1	3,519,600	3,519,600	大阪大学
2 4	高コントラスト分光器 (CHARIS) 詳細設計	プリンストン大学 (特注品)	1	102,431,729	102,431,739	国立天文台
	2K Deformable Mirror	視野 1.7" x 1.7	1	9,488,612	9,488,612	国立天文台
	PLATO-F アップグレード	出力電力 2kW	1	6,589,600	6,589,600	国立天文台
	セントラルブリッチアッセンブリ・衝突試験装置用構成部品	特注品	1	4,647,510	4,647,510	神戸大学
2 5	高コントラスト分光器詳細設計及び一部製造	プリンストン大学 (特注品)	1	121,828,918	121,828,918	国立天文台
	フーリエ変換型赤外分光分析装置	パーキンエルマージャン Frontier MIR/NIR	1	2,992,500	2,992,500	東京大学
	IFS125HR 用 1 回反射 ATR サンプルングユニット	ブルカー オプティックス (株)UR119877	1	2,190,982	2,190,982	東京大学
2 6	CHARIS の設計製造	プリンストン大学 (特注品)	1	54,335,664	54,335,664	国立天文台
	Power Server	(株)アイスクエア製品	1	1,406,160	1,406,160	大阪大学
	VC82637Vv-1 UXHPT	(株)日本コンピューティングシステム	1	993,600	993,600	東京大学
2 7	CHARIS の設計製造	プリンストン大学 (特注品)	1	30,846,199	30,846,199	国立天文台
	KL グリズム	NTT アドバンステクノロジー社製 (特注品)	1	1,296,000	1,296,000	国立天文台
	RAID ストレージ 12TB 6 個他	WDBLWE0120JCH-JESN, WD4003FZEX	1	752,580	752,580	東京大学

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成23年度】

・旅費

計画研究 B02 理論的研究の打合せ ¥8,262,571- 情報収集に必要となる旅費のため

計画研究 AO1 研究打合せ ¥3,258,291- 観測装置共同開発に必要となる旅費等のため

計画研究 B01 研究打合せ ¥3,099,343- 班内での立ち上げ研究会の実施のための旅費のほか、観測・実験実施の準備に必要な旅費のため

・人件費・謝金

計画研究 B02 理論的研究の推進 ¥4,728,702- 研究員雇用のため

・その他

計画研究 A01 研究会開催 ¥1,942,820- 研究会開催に係る諸経費等のため

【平成24年度】

・旅費

計画研究 B01 研究打合せ ¥9,566,411- 観測的研究の準備・結果検討の打合せ、その他、理論モデリング、実験研究の打合せ、情報収集に必要となる旅費のため

計画研究 A02 理論的研究の打合せ ¥6,064,412- 情報収集の必要となる旅費のため

計画研究 B02 理論的研究の打合せ ¥5,276,400- 情報収集に必要となる旅費のため

計画研究 A01 研究打合せ ¥3,112,981- 観測装置共同開発に必要となる旅費等のため

計画研究 X00 研究会開催 ¥1,573,981- 研究会出席者の旅費等のため

・人件費・謝金

計画研究 B01 研究員雇用: ¥16,165,279- 理論、赤外線観測、電波観測の推進のための研究員雇用のため(各1名、合計3名)

計画研究 B02 理論的研究の推進 ¥12,584,421- 研究員雇用のため

計画研究 A02 理論的研究の推進 ¥11,140,289- 研究員雇用のため

・その他

計画研究 A01 研究会開催 ¥3,474,742- 研究会開催に係る諸経費等のため

【平成25年度】

・旅費

計画研究 B02 理論的研究の打ち合わせ ¥9,949,725- 情報収集に必要となる旅費のため

計画研究 AO2 理論的研究の打ち合わせ ¥9,398,140- 情報収集に必要となる旅費のため

計画研究 B01 研究打合せ ¥8,244,086- 観測的研究の実施・結果検討の打ち合わせ、その他、理論モデリング、実験研究の打ち合わせ、情報収集に必要となる旅費のため

計画研究 X00 研究会開催 ¥2,686,848- 研究会出席者の旅費等のため

計画研究 A01 研究打合せ ¥2,507,886- 観測装置共同開発に必要となる旅費等のため

・人件費・謝金

計画研究 B01 研究員雇用 ¥28,393,201- 理論(2名)、赤外線観測(1名)、電波観測(1名)、ダスト実験との協調(1名)のための研究員雇用のため(合計5名)

計画研究 B02 理論的研究の推進 ¥13,401,713- 研究員雇用のため

計画研究 A02 理論的研究の推進 ¥11,313,914- 研究員雇用のため

・その他

計画研究 B01 理論的研究の推進 ¥3,320,703- 分光器レーザー交換、講師招聘経費、研究会参加費等

計画研究 AO1 研究会開催 ¥1,336,695- 研究会開催に係る諸経費等のため

計画研究 A02 研究の推進 ¥1,237,765- エアロゾル分光データ計測システム、計算機ストレージ導入のため

【平成26年度】

・旅費

計画研究 B02 理論的研究の打合せ ¥9,954,599- 情報収集に必要となる旅費のため

計画研究 BO1 研究打合せ ¥7,562,099- 観測的研究の実施・結果検討の打合せ、その他、理論モデリング、実験研究の打ち合わせ、情報収集に必要となる旅費のため

計画研究 A02 理論的研究の打合せ ¥6,873,115- 情報収集に必要となる旅費のため

計画研究 A01 研究打合せ ¥3,425,996- 観測装置共同開発に必要となる旅費等のため

計画研究 X00 研究会出席 ¥1,697,543- 研究会出席者の旅費等のため

・人件費・謝金	
計画研究 B01 研究員雇用	¥26,157,896- 理論(1名)、赤外線観測(1名)、電波観測(2名)、ダスト実験との協調(1名)のための研究員雇用のため(合計5名)
計画研究 B02 理論的研究の推進	¥12,534,163- 研究員雇用のため
計画研究 A02 理論的研究の推進	¥11,160,160- 研究員雇用のため
計画研究 A01 研究員雇用	¥9,296,960- SCExAOの開発、重力マイクロレンズ法による観測等
計画研究 X00 事務支援員雇用	¥2,582,994- 総括班事務支援のため
・その他	
計画研究 A01 研究会開催	¥2,364,214- 研究会開催に係る諸経費等のため
計画研究 B01 理論的研究の推進	¥1,406,560- 研究会参加費、研究員居室使用料、論文掲載費用、精密機器輸送代などのため
計画研究 X00 研究会開催	¥1,315,047- 研究会開催に係る諸経費等のため
【平成27年度】	
・旅費	
計画研究 B02 理論的研究の打ち合わせ	¥9,295,913- 情報収集に必要となる旅費のため
計画研究 B01 理論的研究の推進	¥7,764,799- 観測的研究の実施・結果検討の打ち合わせ、その他、理論モデリング、実験研究の打ち合わせ、情報収集に必要となる旅費のため
計画研究 A02 理論的研究の打ち合わせ	¥6,702,337- 情報収集に必要となる旅費のため
計画研究 A01 研究打合せ	¥3,930,072- 観測装置共同開発に必要となる旅費等のため
計画研究 X00 研究会出席	¥1,317,974- 研究会出席者の旅費等のため
・人件費・謝金	
計画研究 B01 研究員雇用	¥23,747,165- 理論(2名)、赤外線観測(1名)、電波観測(1名)、ダスト実験との協調(1名)のための研究員雇用のため(合計5名)
計画研究 B02 理論的研究の推進	¥8,744,831- 研究員雇用のため
計画研究 A02 理論的研究の推進	¥11,631,585- 研究員雇用のため
計画研究 X00 事務支援員雇用	¥2,817,978- 総括班事務支援のため
・その他	
計画研究 B01 研究の推進	¥2,061,318- 理由=>論文掲載費用、研究会参加費、研究員居室使用料等
計画研究 X00 研究会開催	¥1,910,196- 研究会開催に係る諸経費等のため

(3) 最終年度(平成27年度)の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

【研究項目A01】

高コントラスト赤外線分光器の製作工程の遅れにより、同装置の完成及び試験観測に必要となる経費を平成28年度に繰越した。

【研究項目A02】

平成27年7月に、集約しつつあった同期回転惑星の大気大循環の自転パラメータ依存性を調査する数値シミュレーションについて、他グループから高解像度数値計算を用いた研究成果が公表され、これを上回る大規模な追加計算と解析を、研究期間を3か月延長して行う必要が生じ、そのための97万円の経費を繰り越した。

【研究項目B01】

平成27年11月、銀河系内部星団データ解析結果の取りまとめを行う過程で、当初の予想に反し、原始惑星系円盤の高い存在確率の可能性を見出した。研究遂行上、この可能性の本質について見極めるために詳細解析が追加的に必要となったことから、6か月間の予定で研究実施期間を延長した。

【研究項目B02】

最終年度途中で、雇用していた研究員が就職した。その研究員がする予定であった、中心星近傍におけるスーパーアースの集積の大規模シミュレーション、および、その大気モデリングと観測との比較を新規の研究員に行ってもらうために、人件費分を繰り越した。

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

【研究項目 A01】

木星型ガス惑星の直接撮像においては、現在発見されている6個の恒星に付随する9個の惑星のうち、2個の恒星のそれぞれに付随する惑星を新たに検出し、今後キャラクタリゼーションが重要となる系外惑星、及び惑星大気の研究に向けて、対象となる天体数を有意に増やした。特に、そのうち1個(GJ504b)については、質量が木星の4倍、表面温度が510 K、年齢1.6億歳であり、「第二の木星」と呼ぶことのできる天体の直接検出として、当該及び関連分野に大きな影響を与えた。

重力マイクロレンズ法による系外惑星の間接検出については、スノーラインの外側において多数の惑星を検出し、うち1例は地球型惑星1個の検出に成功した。

高コントラスト赤外線面分光器の開発については、工程の遅れから期間内に観測を開始するに至らなかったが、同装置は現在ハワイ観測所で最終調整の段階であり、本年7月から試験観測を開始する予定である。本装置の完成は、系外ガス惑星のキャラクタリゼーションにとって重要なマイルストーンであり、本領域終了後にこの装置を使用した系外ガス惑星のキャラクタリゼーションが進展するものと期待している。

【研究項目 A02】

液体の水が安定に存在できるための惑星軌道(中心星放射量)、惑星年齢、 H_2O 量、自転パラメータ等に対する依存性を浮き彫りにし、当該分野における地球型惑星の大気形成と進化の理解を大きく前進させた。特に、巨大衝突後の原始水蒸気大気とマグマオーシャンの共進化の二分性の解明(Nature, 2013)は、地球型惑星の大気の多様性を整理し、また将来の観測を予測する新しいフレームワークとして広く受け入れられつつある。また本研究で開発した大気循環数値モデルは、地球大気大循環のシミュレータ間国際比較実験への参加などを通じて、将来の地球環境変動の数値予測の向上にも貢献する一方、仏フランス気象力学研(LMD)の大気モデリングチームとの連携により金星や火星などの大気シミュレーションモデルの高度化にも用いられ、わが国の進める太陽系探査のデータ解釈や立案に貢献しつつある。

また、生命存在の条件についての一般書「生命の星の条件を探る」(阿部著、文藝春秋、2015年)を著した。

【研究項目 B01】

ALMA観測を軸に、理論・実験の研究者を結集した研究グループ構成をとった。本科研費の活動を通じて、この分野における手法の違いを超えた共通の研究基盤が確固として確立し、その結果として手法間の共同研究に基づく多くの成果を輩出した。

ALMA やすばるの高解像度観測では、原始惑星系円盤には、非軸対で動径方向に局在化した柱密度分布が普遍的に存在していることが明らかになった。さらに、年齢が百万年を切るような若い星である HL Tau で惑星形成の兆候が捉えられた。これらは、円盤の初期条件として軸対称で動径方向にべき乗の密度分布を仮定し、約一千万年かかって惑星が形成されるとする古典的太陽系起源論とは、全く異なる状況である。すなわち、太陽系外の惑星系形成には多様なモードが存在することを示し、今後の惑星系形成の研究に質的な変革を促すものと位置づけられる。さらに、系外惑星系の多様な姿や系外惑星大気の起源を、今後さらに深く理解していくための、重要な手がかりを与えるものと位置づけられる。

【研究項目 B02】

惑星形成理論、理論モデリングを主題としていたが、地球型惑星の形成モデルにおいては、系外惑星系における生命を宿す環境を備えた惑星(ハビタブル惑星)の議論に大いに寄与した。質量、軌道半径だけで言えば、地球と似た環境の惑星が存在する確率は太陽型星の数十%に登ることを、本研究項目で解明した基礎プロセスを組み込んだモンテカルロ惑星生成モデルによって示したことは、アストロバイオロジー分野、地球科学分野、および一般の人々に大きなインパクトを与えた。ここのモンテカルロ惑星生成モデルは、学部学生向けの教科書『惑星形成の物理』(井田・中本著、共立出版、2015年)に解説した。また、系外のハビタブル惑星における生命についての議論は一般書『地球外生命』(長沼・井田著、岩波新書、2014)に著した。

ALMAによる円盤構造に対する理論モデルや観測は、原始惑星系円盤という天体にダストとガスの相互作用やダストの成長というマイクロ・プロセスが重要な役割を果たすという点で、天文学における新しい可能性を切り開くものとなった。

他方、プラズマ加熱による磁気乱流の安定化の議論は固体微粒子を含むプラズマ(ダストプラズマ)の物理現象としても興味深く、物理学にも影響を与えている。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

【研究項目 A01】

A01 班には、研究開始当時 39 歳以下だった 4 名の若手研究者が研究分担者として含まれている。それぞれの研究者が独自の研究を伸ばす取組を行った結果、各研究者とも高い評価を受ける研究成果を挙げた。たとえば Olivier Guyon 氏（開始当時 36 歳）は、本研究を開始して翌年 MacArthur Fellow (<https://www.macfound.org/fellows/866/>) に選ばれた。これは合衆国在住の優秀な研究者に、5 年間にわたって総額 50 万ドルの給付金（使途を問わない）を支給する制度であり、同氏の高コントラスト撮像分野における卓越した業績が評価されたものである。同氏は、本領域終了後も、国立天文台ハワイ観測所の主任研究員かつアリゾナ大学助教授として活躍を続けている。また住貴弘氏（開始当時 37 歳）は、重力マイクロレンズ現象を利用して多数の系外惑星を検出し、地球型惑星の検出にも成功した。同氏は、名古屋大学助教から大阪大学准教授に昇任し、同大学にて系外惑星研究をリードしている。この他に、左近樹氏が星間ダストの性質の研究において、また藤原英明氏は原始惑星系円盤の観測研究において業績を挙げた。

【研究項目 A02】

専門の異なる若手 2 名を PD として雇用した。大気モデル開発のミーティングを TV 会議で毎週行う一方、年に一度、系外惑星大気 WS を開催し、会合企画に加わることを通じて PD に研究分野全体の把握を促すとともに、大学院生を含め研究へのアドバイスをを行い、相互交流を深める場を提供した。専門性の異なる PD の共同研究により、スペクトル観測から系外地球型惑星の進化段階を決定する可能性を定量的に示す成果を得た。若手の国際性を向上させるために、PD と大学院生の国際学会や研究会への参加を積極的にサポートした。代表者と分担者に実質的に指導し、本計画研究の一部をなす研究を行った博士後期課程大学院生は 9 名である。うち 1 名が学位取得後、他科研費の PD に着任している。また 5 名が 2016 年度に学位を取得する見込みである。PD の 1 名は学振特別研究員として、もう一名は他科研費の PD として研究を継続している。また連携研究者の博士研究員 1 名が、高専の准教授（パーマネント）に異動した。分担者のなかで最年少の関根が、講師から准教授に昇進するとともに、平成 28 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した。

【研究項目 B01】

大規模なデータ解析や数値シミュレーションを実施するために、多くの若手研究者を研究員として雇用した。彼らは多くの論文成果を自身で挙げたほか、研究代表者・分担者や他研究項目の研究者との共同研究を通じて、領域全体の活性化に大きく貢献した。

その結果として、研究員として雇用した若手研究者の多くが、常勤職（谷川享行氏が産業医科大学助教に、塚越崇氏が茨城大学理学部助教（任期付）に、安井千香子氏が国立天文台助教に）、あるいは海外を含む研究機関で新たなポストクの地位（金川和弘氏がポーランドの University of Szczecin、樋口あや氏が理研、ロ・スニョン氏が韓国の Ulsan National Institute of Science and Technology）を得ており、原始惑星系円盤や惑星系形成分野を支える若手研究者となっている。研究分担者として一翼を担った武藤・深川も、若手研究者を対象とする賞を受賞（日本惑星科学会最優秀研究者賞、自然科学研究機構若手研究者賞）した上で准教授に昇進し、さらに、相川・田中も教授へと栄転し、それぞれ今後この分野のリーダーとしての活躍が期待される。

【研究項目 B02】

主な研究手法は理論研究であり、研究費の大半は、若手研究者の雇用および大学院生を含む若手研究者の旅費といった若手育成、国際共同研究促進のための研究代表者および研究分担者の海外渡航旅費、国際研究集会や合宿研究会を主催するための旅費として活用した。

結果として、研究員として雇用した若手研究者は次々に、常勤職やより上のレベルのポストに移行し、今後の系外惑星研究を支える若手研究者となっている（奥住は 5 年の間に、博士課程学生から東工大の准教授までステップアップした）。また、大学院生を積極的に海外に送り出し、日本で開催した国際会議に出席させたことにより、多くの大学院生の国際化を促し、何人もの大学院生が国際共同研究を開始させている。多数の学振特別研究員（DC、PD）にも採用され、日本惑星科学会秋季講演会の若手最優秀発表賞（2 名）、東工大の博士論文賞（手島精一記念研究賞）、名古屋大学研究科長賞など、学会や大学などでの受賞も多い。

11. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

本研究領域では、観山正見（広島大学・特任教授・理論天体物理学）、松井孝典（千葉工業大学・惑星探査研究センター所長・惑星科学）山田亨（JAXA 宇宙科学研究所・教授・観測天文学）の3氏に統括班の評価担当を依頼している。これらの評価者には、毎年開催する大研究会に都合のつく限り出席してもらい、本領域の成果の全貌把握に努めていただくと同時に、個別に興味あるテーマの進捗については随時報告して評価していただいているところである。

【観山正見教授】

本研究領域は、近年急速に発展している「系外惑星」研究をさらに一歩進め、「宇宙の中に存在する地球型惑星」の探索と、その形成過程・存在頻度に関する理解を深めることを目指している。この目的を達成するためには、天文学と惑星科学という「二つの手法の融合」という方向性と、系外惑星の母胎と系外惑星自身の性質という「二つの対象を繋げる」という方向性とで、それぞれ大きな飛躍が望まれる。ここではこのような視点から、これまでの領域全体の成果を踏まえつつ評価を試みる。

まず「手法の融合」という側面からは、「系外惑星の更なる発見」という天文学上の進展と、「系外惑星パラメータ分布の再現」という惑星科学上の進展とが相まって進んでいる点に注目したい。具体的には、すばる望遠鏡によって大きな軌道半径をもつ巨大ガス惑星の直接検出に2例成功したことや、重力マイクロレンズ法によって地球型惑星1個を含む36個の惑星の間接検出がなされた(A01班)。一方で、N体計算とモンテカルロ法を組み合わせた惑星軌道離心率分布の再現や巨大惑星の重力散乱による影響に関する研究が進捗している(B02班)。これらは、天文学的手法による「系外惑星の完全な探索へ向けた努力」と、惑星科学的(惑星形成理論も含む)手法による「系外惑星系の進化系列の全貌解明」とが両輪となって、宇宙における系外惑星の包括的な姿を解明するチャレンジングな試みである。また最近観測がスタートしたALMAからは、円盤の自己重力不安定によって惑星が形成されてもおかしくないような現場が見つかった(B01班)。このような新たな発見とシミュレーションによって、上述した手法の融合による系外惑星の研究が進展した。特に、惑星形成の多様性という側面からもこの度の研究は大きな展開が図られたと考える。

一方、系外惑星とその母胎となる円盤という「二つの対象を繋げる」という側面から特に注目されるのは、円盤中に含まれるマイクロサイズの固体微粒子(ダスト)から、キロメートル・サイズへの微惑星へと至る過程が、一貫した計算により世界で初めて再現された成果である(B01、B02班)。ダストから微惑星へと至る道筋については、太陽系形成論が1980年代に確立された後も、長らく論争になっていた問題である。それに関して、初めて説得力ある方向性を示したことは、この問題を大きく解決に導く鍵を与えた成果として評価したい。ただし、微惑星形成過程については、今後、世界的な評価を受けてその方向性が確立していくものと思われる。また、この方向性を今後さらに発展させるためには、すばるやALMAといった大型観測装置で得られる観測情報も踏まえ、原始惑星と円盤との相互作用も含めた検討が必要となろう。すでにグループ内でそのような動きが具体化しているので、本領域は今後の系外惑星研究のさらなる発展へ繋がると期待できる。

また、円盤と惑星との相互作用という観点から、もう一つ忘れてはならないのは、円盤物質がいかんして惑星物質、特に惑星大気や、地球型惑星を特徴付けている海に取り込まれるのかという問題である。この面においても、天文学の立場(A01、B01班)からは星間化学で確立された手法が、惑星科学の立場(B02、A02班)からは比較惑星学で確立された手法が、それぞれ応用され、精密なモデル化が順調に進んだと評価できる。また、これらモデルの検証をめざした新観測装置(SCEXAOやCHARIS)の開発が進んだ。CHARISについては、製作工程の遅れのため期間内に惑星大気の分光観測が開始できなかったのは残念だが、装置はすでに完成しているので、領域終了後の成果に期待したい。

以上を総括すると、本新学術領域では研究題目にある「地球型惑星」に様々な手法で着実に迫っており、その起源の詳細と多様性を理解していく上で多彩な成果が実現できたと評価する。

【松井孝典所長】

計画研究A02を中心に評価を行った。本計画研究で開発を進めた大気循環と大気放射の数値モデルは、観測データの豊富な太陽系惑星大気の循環と構造について良好な再現性を得るに至っている。これらを駆使し、系外地球型惑星表層における水の安定性について、母星からの距離、表層水量、自転要素等に対する依存性を系統的に調べ、陸惑星における液体の水の両極域への局在化や、同期回転湿潤惑星における対流雲アルベドの増大など、ハビタブルゾーンを拡大させるメカニズムを新たに見出した。また複数の凝結

成分を組み込んだ木星型惑星の雲対流のシミュレーションを世界に先駆け成功させ、積乱雲の発生サイクルと大気中の重元素濃度の関係や、動的に決まる物質分布の放射過程への影響を明らかにした。高温状態から出発する地球型惑星の進化について、マグマオーシャンが長期間保持される場合と、大部分の水蒸気が速やかに凝結し海洋が形成する場合に類別されることを提唱した理論は世界的な注目を集めるとともに、各進化段階における惑星熱放射の観測可能性を定量的に示すなどの発展を見せている。新規開発装置による系外巨大惑星の直接分光観測が期間内に実現しなかったのは残念だが、将来の観測研究との融合を目指したモデリング研究が進んだことは高く評価できる。

【山田亨教授】

本新学術領域は、「太陽系外惑星」という新しい融合分野について、その探査とキャラクターゼーション、および原始惑星系円盤における惑星形成論の観点から、光赤外および電波など多様な手法での観測、原始惑星系円盤・惑星形成・惑星大気についての理論、そして数値シミュレーションなどの多角的な方法により、非常に活発な研究が進められた点について、高く評価できる。

計画研究 A01 については、すばる望遠鏡 SEEDS プログラムでのガス惑星の系統的な観測の成果が着実に出ており、もっとも「第二の木星」と呼ぶに近い惑星の検出をはじめ、同プログラムでは直接の科学成果の創出に加え、若手研究者の国際共同研究への積極的かつ主体的な参加の機会、周辺分野との連携にも大きな成果を挙げた。高コントラスト赤外線分光器の開発も、多少の遅れは出たものの着実に進んだ。この装置は現時点で完成してハワイにあるので、今後のすばる望遠鏡による観測に期待ができる。また重力マイクロレンズ法による地球質量、海王星質量の惑星探査は着実な成果を挙げた。

計画研究 A02 については、大気循環についての 3 次元惑星大気シミュレーションの構築も進められ、ハビタブルゾーン付近の惑星の温室効果についての知見が得られた。また、大気進化については、惑星の固化と初期大気の進化は、大気による温室効果や中心星の極紫外線による水蒸気の散逸と結びついているという、新たな知見に基づくモデルを構築し、地球と金星との相違を説明する理論を提唱するなど大きな成果を挙げた。今後、これらの理論・モデルをどのように検証してゆくか、と言う観点でも将来的な研究の発展に期待したい。

計画研究 B01 では、まず ALMA による円盤研究の着実な成果が挙げられる。SEEDS プロジェクトをはじめとした、すばる望遠鏡による円盤の散乱光観測などとの相補的発展も進み、原始惑星系円盤における惑星形成の観測的な検証を進めた。一方、円盤内固体物質の成長については実験・理論の構築が進んだ。

計画研究 B02 では、原始星の形成過程、およびその直後に始まる原始惑星系円盤の形成過程のシナリオを構築して、新たな描像を得るなどの成果を挙げた。また、氷惑星の形成過程についても、高空隙率化に伴う塵の空気力学的特性の変化が、氷の塵の急速な合体成長を引き起こし氷惑星が形成されるという、新たな描像を得る成果も挙げた。惑星形成の理論的研究が様々な面から進められており、高く評価される。

観測・理論両面で多岐にわたる成果を上げていることは、本研究課題の充実を示しているが、とくに惑星大気研究分野と系外惑星研究分野の融合的な発展、また、ALMA による高解像度観測と円盤・惑星形成モデルの精密な比較などの融合的研究については、本課題の成果を基礎としての今後のさらなる発展を期待したい。

さらに、計 14 件の公募研究の実施、国内・国際研究会の主催など、活発な研究交流の実施、PD 雇用による若手研究者の教育・研究機会の提供など、当研究領域を活性化させるための活動性も高く評価される。