

領域略称名：系外惑星 領域番号：2302

平成25年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「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25年6月

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	3
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	5
3. 研究の進展状況	7
4. 若手研究者の育成に関する取組状況	11
5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	13
6. 総括班評価者による評価	15
7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	18
8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	22
9. 今後の研究領域の推進方策	29
10. 組織変更等の大幅な計画変更がある場合は当該計画	32

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ程度）

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、これまでの研究成果を発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』

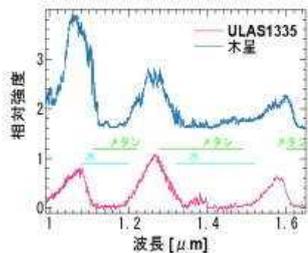
本領域では、天文学と惑星科学の密接な連携・融合によって、我が国において「系外惑星」という新たな学術領域を確立して世界的リードを狙うことで、当該分野における我が国の学術水準を飛躍的に向上・強化することを目的とする。その中心となるのは、直接的・間接的観測手法を用いた太陽系外惑星の検出である。これによって、木星型から地球型にいたる多様な惑星の性質や、その形成と進化の統一的理解を目指す。木星型ガス惑星については、独自開発したすばる望遠鏡用の観測装置を用いて多数の惑星を直接検出し、軌道半径1AU程度の生命存在可能領域（ハビタブルゾーン）から太陽系のサイズに至る範囲でガス惑星を直接検出することを目指す。また、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）の形成へといたる過程や、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

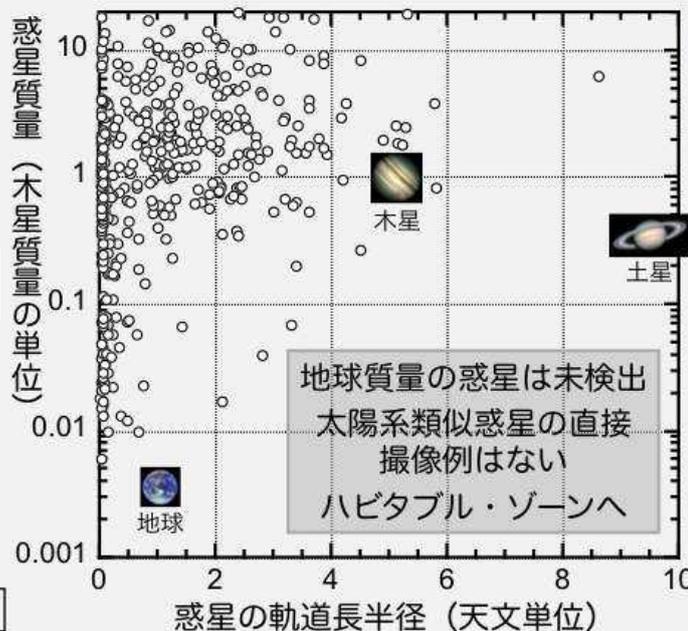
A: 木星型からハビタブル地球型まで



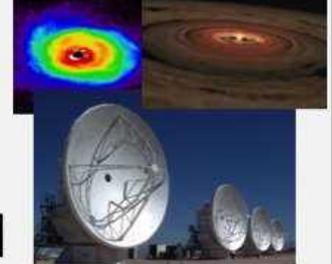
地球型・木星型惑星をハビタブルゾーンに検出、木星型を分光



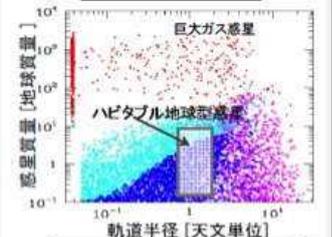
惑星大気モデリングと大気進化



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てきた。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發展：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. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

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、研究組織間の連携状況について図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

『計画研究と研究項目との関係』

本領域は以下の4件を研究項目として設定しており、それぞれが4件の計画研究と1対1に対応している。

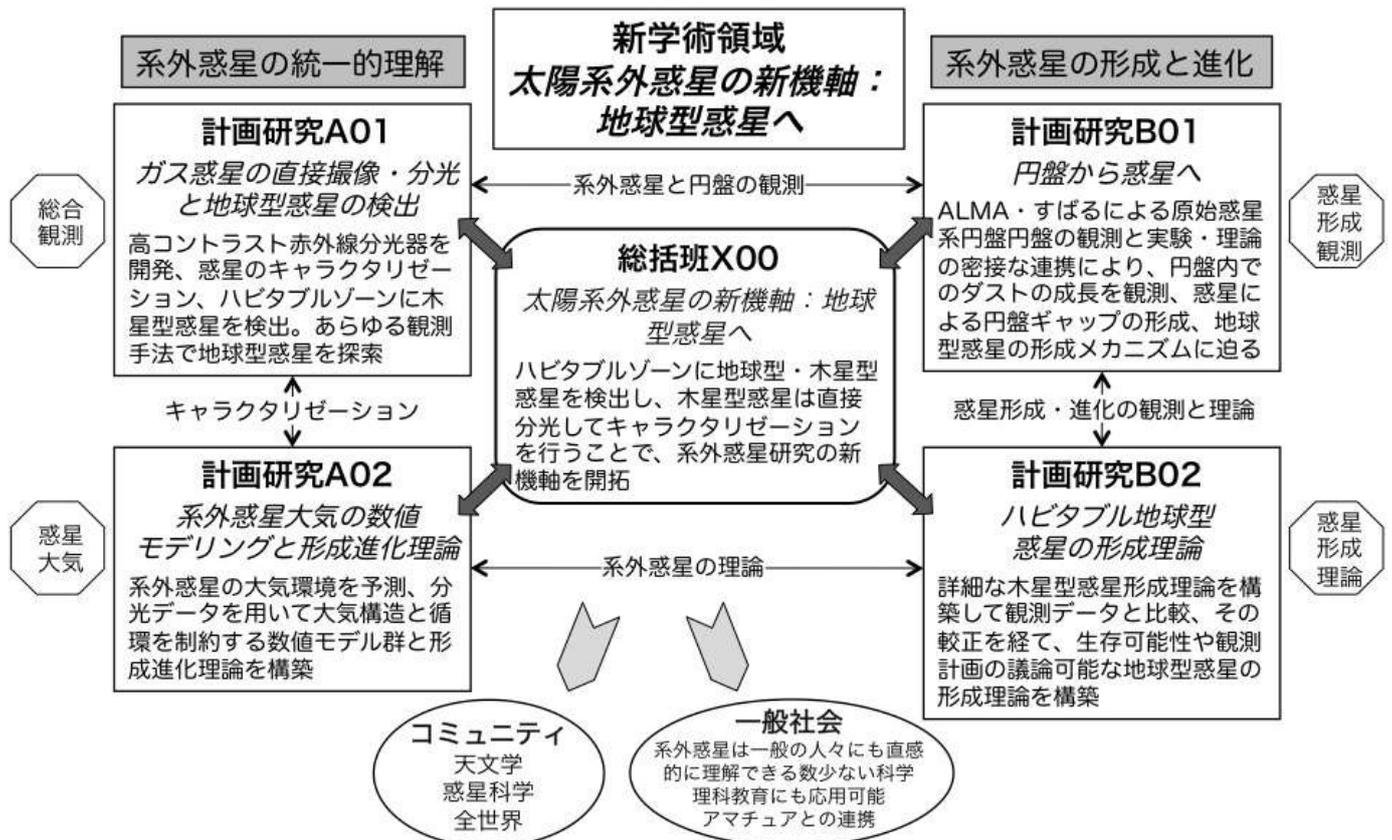
A01：ガス惑星の直接撮像・分光と地球型惑星の検出

A02：系外惑星大気の数値モデリングと形成進化理論

B01：円盤から惑星へ

B02：ハビタブル地球型惑星の形成理論

また、これらの計画研究間の協力・連携を図るのが総括班の役割である。



総括班及び計画研究相互の関係を示したものが上図である。

本領域における研究項目（計画研究）は、天文学と惑星科学の強い連携・融合のもと、系外惑星の特徴づけや形成・進化の研究を推進するものである。具体的には、研究項目A01とA02は、惑星のキャラクタリゼーションにおいて観測と理論の両輪を担い、強い連携・融合のもとに推進する。同様にB01とB02は、惑星形成、特に地球型惑星の形成における観測と理論の両輪であり、強い連携・融合のもとに推進する。また、A01とB02は、ハビタブルゾーンに存在する惑星を理論的に予測し、それを検証するという強い連携関係にある。

『研究組織間の連携状況』

本研究領域における計画研究間の連携については、総括班メンバー（領域代表者、計画研究代表者、領域事務担当者より構成される）の密接な連絡や、必要に応じて直接会合する総括班会議を通して推進を図っている。計画研究の分担者、ポスドク、大学院生など、個々人の研究や連携については、年1回開催する全体会としての大研究会で、領域の成果をできる限り多くの組織構成員や若手研究者を含めて共有し、さらなる連携を深め

るように努めている。また、今年度は大研究会を国際研究会として海外で開催する準備を進めており、領域の成果を海外に向けても強くアピールする方針である。

4つの研究項目は、どのふたつをとっても相互に密接な関係があり、相互連携を強める必要がある。そのため、より専門的な研究課題については、ふたつの計画研究関係者どうして小規模の合同研究会を開催することも行なっている。たとえば、平成25年2月にはB01班とB02班が合同研究会を開催し、取得されたばかりのALMAによる原始惑星系円盤の観測成果を、最新の惑星系形成理論でどう理解するかについて、活発な議論がなされた。

またそれぞれの計画研究班には、異なる機関に所属する多様な研究者が研究分担者や連携研究者として所属しているので、各班内でも合宿等を通じて、班ごとに最大の研究成果が創出できるよう工夫している。

『研究項目と公募研究の関係』

本研究領域では、昨年度と今年度の2年で行う公募研究として、以下の9件を採択した。

1. セグメント型望遠鏡のための共通光路シアリング干渉計開発（村上尚史・北大）
2. 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（西山正吾・国立天文台）
3. 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（竹広真一・京大）
4. 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（佐野孝好・阪大）
5. 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（田中今日子・北大）
6. 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（谷川享行・北大）
7. 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（塚越崇・茨城大）
8. GPUとSSDを利用したパソコンによる高解像度円盤シミュレーション（村主崇行・京大）
9. 銀河系スケールでみる原始惑星系円盤の進化：円盤降着過程の観測的解明（安井千香子・東大）

これらの公募研究は、計画研究ではカバーできないものや、小規模でも萌芽的・独創的なものが採択されており、本研究領域が終了した後も、我が国における系外惑星研究が継続して発展するために重要なものである。

たとえば公募研究1は、本領域ではカバーしていない干渉計という手法を用いて主星周囲の極めて暗い天体を検出しようとする試みであり、すばる望遠鏡のような単一鏡ではなく、セグメント鏡への応用を考えている。これは、我が国も主要メンバーとして建設が始まろうとしている口径30mの次世代超大型光学赤外線望遠鏡TMTを用いて地球型惑星を直接検出するための基礎技術となり得ると考えている。

あるいは公募研究8は、原始惑星系円盤のような複雑な流体系の進化を、高い空間分解能で追うための専用計算機（ハードウェア）の開発である。我が国で発明された重力多体問題専用計算機（GRAPE）の出現によって、重力多体問題の計算において我が国が圧倒的な優位に立ったように、この専用計算機の開発は、原始惑星系円盤の進化をシミュレーションし、惑星系形成で現在最大の未解決問題とされているダストの成長過程も含めたシミュレーションにも挑めるレベルの基礎開発となると期待している。

以上のように、5年間で系統的な成果を挙げることを目標とする計画研究に対し、公募研究は、系外惑星研究の分野が本領域終了後も10年スケールで発展していく可能性を見据えた構成となっている。

3. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究毎に整理する〕（3ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在どこまで研究が進展しているのか記述してください。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、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究毎に記述してください。

【研究項目 A01】

研究項目 A01 では、観測的手法により、ガス惑星の直接撮像・分光と地球型惑星の検出を目的としている。これを実現するため、(1) すばる望遠鏡によるガス惑星や円盤の直接撮像観測、(2) 直接分光観測によるガス惑星の特徴付け、(3) 地球型惑星の間接検出、以上 3 つの個別目標を設定した。

1. すばる望遠鏡によるガス惑星や円盤の直接撮像観測

【目的】 すばる望遠鏡を用いて、太陽系のサイズ(1-40 AU)にあるガス惑星を直接撮像する。

【進展状況】 オールジャパン体制のもと、プリンストン大学やマックスプランク研究所との共同研究により、すばる望遠鏡による戦略観測プロジェクト SEEDS (Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with Subaru) が順調に進展している。これには 5 年間で 120 夜の観測時間が割り当てられており、現時点でほぼ 3/4 の観測が終了した。ガス惑星の直接検出については確実な 1 個について出版済みで、他に複数の候補天体について確認中である。また研究項目 B01 との連携のもと、多数の原始惑星系円盤の撮像にも成功しており、当初の予定通り順調に進展している。

2. 直接分光観測によるガス惑星の特徴づけ

【目的】 高コントラスト赤外線面分光器 (CHARIS) と超高精度波面補償光学装置 (SCExAO) を開発してガス惑星を直接分光し、A02 班の理論研究との連携のもと、惑星を特徴づける (キャラクターゼーション)。

【進展状況】 CHARIS の開発・製作は、プリンストン大学との共同研究として、ほぼ当初計画通りに順調に進展している。これまでに概念設計、詳細設計を終了し、現在は最終設計を実施中である。また光学部品、赤外線検出器等の調達を進めており、当初計画に沿って順調に進展している。SCExAO は国立天文台ハワイ観測所にて製作中であり、マイルストーンごとにすばる望遠鏡に搭載し実験を行って性能確認をしている。

3. 地球型惑星の間接検出

【目的】 間接検出法によって地球型惑星を間接検出する。

【進展状況】 ドップラー法による観測については、すばる望遠鏡への高精度赤外線ドップラー分光器の搭載を待って開始する予定である。トランジット法については、専用のカメラを南極ドームふじ基地に設置し、遠隔制御試験を実施中である。重力マイクロレンズ法については、2011 年と 2012 年のシーズンを終えて、スーパーアースを含む 10 個の系外惑星を検出するなど、予定よりも順調に研究が進展している。

【研究項目 A02】

研究項目 A02 では、理論や数値シミュレーションを手法として、系外惑星大気の詳細なモデリングとその形成進化過程の確立を目的としている。これを実現するため、(1) 系外惑星の大気循環と熱収支の解明と予測、(2) 系外惑星の大気進化の多様性の解明、(3) 系外惑星のキャラクターゼーションと解釈、以上 3 つの個別目標を設定した。

1. 系外惑星の大気循環と熱収支の解明と予測

【目的】 独自の階層化数値モデルのコンセプトに基づく大気数値モデル群を發展させ、系外惑星で想定される多様な境界条件の下で大気循環と熱輸送を自在にシミュレートできる数値モデルを開発する。それを用い、未知の系外惑星大気の大気循環と熱輸送の諸過程を明らかにする。

【進展状況】 階層的数値モデル群の中核をなす、全球大気循環モデルと局所雲対流モデルの開発を進めた。これにより、A01 班の検出目標となる同期回転地球型惑星を想定した大気循環シミュレーションの系統的执行が可能となり。特に小質量星周りのハビタブルゾーン内縁境界を決める暴走温室状態の発生過程について解明が進んだ。また、複数の凝結成分を含む木星型惑星大気の大気循環数値シミュレーションに成功し、積乱雲の発生の間欠性と凝結成分の濃度の間に強い相関関係があることを発見した。さらにハビタブルゾーン外縁部の地球型惑星に出現が期待される、大気主成分の凝結が生じる高圧二酸化炭素大気での雲対流の数値シミュレーションが可能になり、温室効果源となる二酸化炭素雲層が安定に滞留することを示唆する結果を得た。これらは、

当初予定通り順調に進展している。

2. 系外惑星の大気進化の多様性の解明

【目的】 海洋形成理論に代表される先駆的アイデアを打ち出してきたハビタブル水惑星大気の形成進化理論を拡張し、さまざまな境界条件と進化段階にある惑星大気・表層環境の組成・構造の多様性について、理論的に明らかにする。

【進展状況】 地球型惑星の表層環境の進化経路について解明が特に大きく進んだ。具体的には、軌道上の中心星放射強度により、初期に獲得した水の保持性や初期マグマオーシャンの持続期間が大きく二分されることを発見した。この成果は、本計画研究で雇用している PD 研究員を筆頭著者とする論文として Nature 誌に掲載され(濱野ら)、News and Views 欄でも取り上げられるなど大きな世界的反響を得て、研究が予定していた以上に進展した。また流体力学的大気散逸シミュレーションモデルに高精度移流スキームを導入し、現実的な散逸率が先行研究に比べて著しく高いことを明らかにした。

3. 系外惑星のキャラクタリゼーションと解釈

【目的】 惑星放射スペクトルを数値的に推測・再現する数値モデルを構築し、研究項目 A01 の明らかにする木星型系外惑星の直接分光データから、これら惑星大気のキャラクタリゼーションを行い、大気構造とその多様性を明らかにする。多数の惑星について相互比較を行い、多様性をもたらす要因ならびに大気進化過程について理論的解析を行う。また、同班の検出する地球型系外惑星の姿を予言し、次期の目標となる、これらの直接分光観測に向けた知見を蓄積提供する。

【進展状況】 地球型惑星とガス惑星それぞれを想定した大気放射伝達の数値モデルの開発を進めた。ここから循環シミュレーションから得た同期回転惑星における昼夜間熱輸送過程に基本的な解釈を与えることに成功し、また木星型惑星の観測スペクトルに影響する対流圏界面付近の雲形成機構や、成層圏逆転層の形成過程について重要な示唆を得た。またエアロゾル生成とその放射特性を求める光化学実験を進め、これに基づき各成分の上層大気における存在度の決定機構について考察を進めつつあり、当初の予定通り順調に進展している。

【研究項目 B01】

研究項目 B01 では、観測・理論・実験の手法を結集して、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的としている。これを実現するため、(1) 円盤構造の解明、(2) 円盤内固体物質の組成や成長の解明、(3) 円盤ガス物質の組成や進化の解明、以上 3 つの個別目標を設定した。

1. 円盤構造の解明

【目的】 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のため、近赤外から電波波長における観測的手法を通じて円盤の構造を解明する。

【進展状況】 すばる望遠鏡による固体微粒子(ダスト)散乱光近赤外撮像観測、及び ALMA 望遠鏡によるダスト・ガスの観測が進展した。近赤外散乱光では、惑星によって生じた可能性のある溝状構造や非軸対称構造を複数の円盤で見出した。特に、密度波理論を用いた渦巻き形状の解析により、直接捉えられていないガス惑星の位置を推定した。この成果は今後、惑星検出を目的としたより高感度な追観測研究の戦略を立案する上で重要な基礎を与える。一方、ALMA によって観測されるミリ波・サブミリ波放射からは、近赤外散乱光に比べ円盤物質の質量や温度をより直接的に導出できる。初めての ALMA 共同利用公募にあたる Cycle 0 観測では、HD142527 に付随する原始惑星系円盤の中に、ダストが極度に集中し自己重力が効くほど高密度とみられる領域を中心星から 150AU 離れたところ

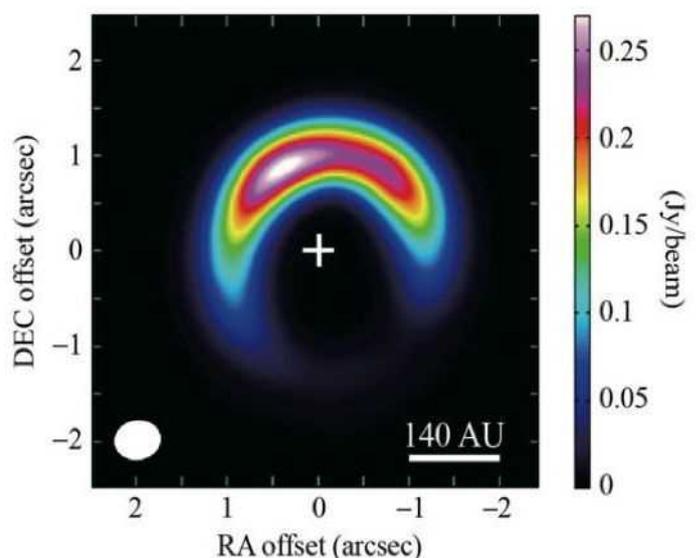


図 3-1 : ALMA によって取得された若い星 HD142527 に付随する原始惑星系円盤のサブミリ波・ダスト連続波イメージ。十字は星の位置を、左下の白い楕円は点源を観測したときに得られる広がり、それぞれ示す。

に見出した(図 3-1)。これは、比較的軽い円盤中の半径 30AU 以内で岩石惑星やガス惑星岩石コアが作られたとする標準的太陽系形成理論とは全く異なる状況であり、地球型惑星形成過程もまた、多様な環境下で起こりうることを示唆するという大きな進展があった。Cycle 1 では本グループ関係者が含まれる観測提案が 5 件採択され、平成 25 年度中のデータ取得を見込んでいる。以上は、ほぼ予定通り進展したと評価できる。

2. 円盤内固体物質の組成や成長の解明

【目的】数値計算を通じて、地球型惑星形成シナリオの中で曖昧だったダストから微惑星へと至る成長過程の理解を深める。

【進展状況】数値計算に基づく研究から、ダスト成長初期に形成される高空隙率・低密度天体が、ガス動圧や自己重力による圧縮作用によって、現在の太陽系小天体で実現されている程度にまで高い密度をもつ微惑星に至ることを示した。この研究は、研究項目 B02 との連携によって実施し(【研究項目 B02】I-(1)を参照)、当初の想定を超える成果が得られている。また、原始惑星系円盤や残骸円盤で見られる結晶化したダストの形成機構に関する理論的成果を得た。これは、円盤ダストの基本的性質を明らかにしたというだけでなく、結晶化ダストを捉えた観測データから円盤物理状態を見積もる重要な手がかりを与える点でも意義深い。この他、氷微惑星の衝突破壊条件を実験的に調べるための低温衝突実験設備を整備し、岩石質ダストに加えて氷ダストが円盤中でどう成長していくかを総合的に理解していく基盤を当初の予定通り整えた。今後、これらの進展を融合させた円盤から地球型惑星へと至る過程の一貫した説明の完成に向けて、明るい展望が開けた。

3. 円盤内揮発性物質の組成や成長の解明

【目的】円盤内の揮発性物質の進化を化学的観点から解明する。

【進展状況】原始星における星周ガス化学組成に関するモデル計算が進展し、複数の論文を発表した。また、地球の海水に含まれる重水素の割合が宇宙元素存在度に比べて有意に高いことに関連して、極低温の原始星で近年観測されている極めて高い D/H 比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・再生成されるかについてもモデル計算を進め、その初期成果をまとめつつある。これらは当初見込んでいた通りの進捗状況であり、今後、原始惑星系円盤内の惑星材料物質のガス化学進化を考える際の初期条件を与え、地球型惑星の海や生命を作った材料物質と宇宙物質との繋がりを理解する第一歩と位置づけられる。これらの知見は、今後、ALMA などによる観測的検証を通じて、さらなる精緻化を見込んでいる。

【研究項目 B02】

研究項目 B02 では、理論や数値シミュレーションを手法として、ハビタブル地球型惑星の形成理論の賀来ルツを目的としている。これを実現するため、(1) 巨大ガス惑星の多様性、(2) スーパーアースの多様性、(3) ハビタブル惑星の存在確率、以上 3 点の解明を個別目標として設定した。目標(1)、(2)に関してはさらに以下のようなサブテーマを掲げ、研究を推進した。

1. 巨大ガス惑星の多様性

1. 微惑星形成過程の解明

【目的】固体微粒子(ダスト)から微惑星への成長過程を説明する理論モデルを獲得する。

【進展状況】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の構築を行い、さらにダストから微惑星への過程に直接的な影響を与える円盤ガスの磁気回転乱流の詳細を明らかにした。それをふまえ、円盤内のダスト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。これは、研究項目 B01 と B02 の研究をうまく連携させて、氷微惑星形成の有力モデルを構築した成果である。また、観測可能性についても解析した。岩石微惑星の形成については、円盤乱流の渦の効果、永年の自己重力不安定の可能性を検討した。この課題は、予想以上に進展している。

2. 複数の巨大ガス惑星の連鎖形成仮説の検証と新しい連鎖形成モデルの提案

【目的】太陽系の木星・土星のように、一つの系内に複数の巨大ガス惑星が形成されるメカニズムを解明する。

【進展状況】巨大ガス惑星がひとつ形成されると、その外側で急速に次の巨大ガス惑星が連鎖的に形成されるという仮説に関して、それが実際に起こることを示し、木星・土星系の形成の新しいモデルを提案した。円盤の粘性散逸光蒸発に関しても解析を行い、順調に進展している。

3. 巨大ガス惑星の軌道多様性

【目的】 巨大ガス惑星の軌道の多様性についてその成因を解明する。

【進展状況】 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（逆行や離心率の軌道のものを含む）ホットジュピターとなり、中間領域に残ったものは高い軌道離心率を維持することがわかり、これまでの観測データを見事に説明した。研究項目 A01 が目指す、直接撮像法によって観測可能な遠方領域に散乱される巨大ガス惑星の分布も予測した。固体コアとして散乱された後でガス集積することにより、遠方でかつ円軌道に近い軌道になることも示し、予定以上に進展している。

II. スーパーアースの多様性

4. 中心星と円盤ガスの磁気結合（→ 組成の多様性）

【目的】 スーパーアースの多様性を探るため、中心星と円盤ガスの磁気結合についてその役割を考察する。

【進展状況】 ケプラー衛星望遠鏡などの最新の観測結果は、太陽型星の数十%以上が短周期スーパーアース（大型地球型惑星）を持ち、その大多数は複数系であることを示す。一方、太陽系を含めて短周期惑星が存在しない系も多い。その後に観測が急進展し、この軌道の多様性とともバルク密度（組成）に大きな多様性があることがわかった。組成の多様性の起源の問題は獲得目標 II-(5)でも扱い、この多様性は揮発性成分含有量の多様性を反映しているはずで、惑星が保持する揮発性成分量は惑星のハビタビリティを左右する。つまり、スーパーアースのバルク密度の多様性の起源を解明することは、獲得目標 III-(6)のハビタブル惑星の形成可能性を理解することに密接に関わる重要な問題でもある。大気はまさに揮発性成分なので、研究項目 A02 と密接にかかわる。したがって、当初計画した中心星と円盤ガスの磁気結合の問題に進む前に、観測データとの比較検討をベースにして、惑星組成の問題に取り組んだ。取り組む順番を変えて進めて、成果を得ている。

5. 巨大衝突に因る集積

【目的】 計算機シミュレーションを通じて共鳴軌道に無いスーパーアースの起源を探る。

【進展状況】 原始惑星の巨大衝突の軌道計算により、観測されている共鳴軌道にないスーパーアースの起源を明らかにした。衝突による揮発性元素の剥ぎ取りの問題は、テストケースとして、木星のガリレオ衛星の組成の多様性の問題に取り組み、さらに3次元衝突シミュレーションを続けており、順調に進展している。

III. ハビタブル惑星の存在確率

6. ハビタビリティに関するファクターの洗い出しとの各要因の解析

【目的】 総合的な知見に基づき、ハビタブル惑星の存在確率について科学的な根拠を得る。

【進展状況】 上記課題の結果をふまえて、後半年次において重点的に進める課題であるが、すでに惑星質量や惑星自転軸の安定性というハビタビリティの各ファクターについての解析は始めており、順調なスタートを切っている。

4. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ程度）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

『国際的に研究をリードする若手研究者育成に関わる取組み』

若手研究者の国内外への学会出席を推奨し、研究討論のために大学院生や PD 研究員を他機関に積極的に派遣している。

特に、SEEDS はオールジャパン体制で実施しており、23 人の大学院生（うち外国人 5 人）と 20 名の PD 研究員（うち外国人 8 名）が参画して、活発に研究成果を出版している。これらの業績により、これまでに 2 名が大学等研究機関で助教以上の職階で採用された（計画研究 A01）。プリンストン大学で開発中の CHARIS には、同大学の大学院生が 2 名参画しているが、今後日本から博士課程の学生 1 名と PD 研究員 1 名を派遣する予定である。地球型惑星の間接検出については、学生 6 名が参加している（計画研究 A01）。

また、J. Kasting 教授（米：ペンシルバニア州立大）や A. Showman 教授（米：アリゾナ大）など、系外惑星大気研究の第一人者の来日機会を活かし、PD 研究員や大学院生が研究を紹介するセミナーを実施し、若手に出席を促して国際性の涵養を図りつつ、研究レベルの向上を目指した（研究項目 A02）。

赤外線観測や解析に関わる大学学生に対し、外国人研究者（アメリカ、カナダ）との共同研究の機会を設けた（研究項目 B01）。また、理論研究における若手研究者育成のため、以下のように海外研究機関への中長期派遣を行った（研究項目 B02）。2 名の博士課程大学院生（ドイツ Max Planck Institut für Astronomie, 2011 年-2012 年の 1 年間；オーストラリア Macquarie University, 2013 年 1-2 月 1 ヶ月）、2 名の PD 研究員（米国/ Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory, High Altitude Observatory, University of New Hampshire, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics 等/2013 年 1-2 月 1 ヶ月；英国/エクセター大学、カーディフ大学、シェフィールド大学等/2012 年 10-12 月 2 ヶ月）、2 名の若手研究者（米国/シカゴ大学 Origins Laboratory, Jet Propulsion Laboratory, UC Berkeley 等/2012 年 8-10 月 2 ヶ月；ドイツ/Institut für Theoretische Astrophysik, 米国/Jet Propulsion Laboratory, UC Berkeley 等/2012 年 1-3 月の 2 ヶ月）。さらに、ドイツ、アメリカのサマースクールに 5 名の大学院生を派遣した（研究項目 B02）。

『若手研究者育成を重視した公募研究』

「2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況」の『研究項目と公募研究の関係』に記した公募研究については、公募時に若手を対象とすることを旨として「本領域では、将来を担う人材育成の観点を重視しており、特に若手による萌芽的な観測や理論の研究提案に強く期待しています。」という一文を入れた。その結果、若手を中心に独創的な応募が多く提出され、9 件の採択者の平均年齢は 36 歳であった。

『若手 PD 研究員の雇用』

これまでに研究項目 A01 で 2 名、研究項目 A02 で 2 名、研究項目 B01 で 3 名、研究項目 B02 では 2 名の優秀な若手を PD 研究員として雇用している。たとえば A01 班では、2 名の PD 研究員がハワイ観測所で SCEXAO の開発に従事している他、地球型惑星の間接検出のため、重量マイクロレンズ法による観測研究を担う PD 研究員 1 名を来年度に雇用する予定である。これらの PD 研究員は、本領域研究の成果創出の最前衛であり、将来わが国の系外惑星分野を発展させていく人材となるよう、各計画研究代表者がその育成に力を注いでいる。

『若手研究者の研究交流の推進』

TV ミーティング等の情報インフラを整備し、週に一度のペースで神戸大、北大、東京大、岡山大を結び、大気放射モデルの開発を中心テーマとした若手主導の研究ミーティングを実施している（研究項目 A02）。これは、若手が常時的に交わり、各人の研究を高めあう場として機能しており、これがベースとなって大学横断的な若手の自主勉強会も作られた。この研究ミーティングにはシニアな研究者がアドバイザーとして出席しており、所属にかかわらず次世代の系外惑星分野を担う若手の指導に当たっている。一方、惑星系形成や円盤観測分野でも、月に一度のペースで TV 会議による研究発表ミーティングを実施している。研究項目 A01, A02, B02 の研究代表者・分担者が所属する 9 機関を中心に、毎回 40 名程度が参加し、若手研究者を中心に研究発表の機会を

与えている。

『若手による研究活性化のためのワークショップや研究会の企画・開催』

系外惑星大気モデリングに関する若手主体のワークショップを年に一度のペースで、また月に一度のペースで北大・神戸大・宇宙研・その他拠点を結ぶ惑星大気研究会を実施した（研究項目 A02）。その際、大学院生やPD 研究員に企画・運営を任せることで、視野と人脈を広げつつマネジメント力が養成されるように指導している。また、これらの研究会での講演の一部は、ビデオ収録して発表資料とともにインターネット上に公開し、最先端研究の電子アーカイブとして、当分野に興味を持つ全国の全ての若手に公開している。これには別途整備を進めてきたホスティングサーバを利用している。

その他に、国内外の研究者を対象として以下の研究会を企画・開催し、特に若手の参加を促して、研究成果に対する活発な議論と交流の場の提供を推進している

- (1) 平成 24 年 4 月に第 8 回太陽系外惑星大研究会を実施し多数の若手研究者の参加を実現し系外惑星研究に関する幅広い情報交流の場を提供（全研究項目）。
- (2) 平成 24 年 5 月に、ALMA 惑星系円盤ワークショップを実施し、若手研究者の観測立案をサポート（研究項目 B01）。
- (3) 平成 24 年 6 月に、国際スクール “CPS International School of Planetary Sciences” を実施し、多数の若手研究者の参加を実現（研究項目 A02 および研究項目 B01 で共催）。
- (4) 平成 24 年 8 月には、系外惑星ダストおよび関連分野の研究者の参加を呼びかけた国際会議 “The 5th meeting on Cosmic Dust” を開催し、多数の若手研究者の参加を実現（研究項目 B01）。
- (5) 平成 25 年 2 月に、研究項目 B02 と共同研究会を実施し、雇用した研究員を含む若手の研究成果に対する議論の場を提供（研究項目 B01）。
- (6) 平成 25 年 8 月に開催予定の若手研究者が主催する研究集会「原始惑星系円盤研究会」に対して、旅費支援と企画に関する助言を行った。
- (7) 平成 25 年度 12 月には、全研究項目合同で国際会議 “The 5th Subaru International Conference, Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II” を実施予定。

5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

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総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

【総括班研究課題】

各研究項目の円滑な実施と事務運営を行うため、事務支援員 1 名を雇用した。また、研究成果の一般社会への還元を行うために、当科研費のウェブページの製作を行なった。本研究課題の多くは国際的な研究の枠組みで遂行されるため、英文ウェブページの製作も行った。また、本研究課題が主催・共催する国際研究会の運営を積極的に行い、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、若手が研究者として第一線で研究交流を図れる機会の提供に、研究費を効果的に役立てている。

【研究項目 A01】

大部分の研究費を、プリンストン大学と共同研究開発を行なっている高コントラスト赤外線面分光器（CHARIS）の開発製作費として使用している。プリンストン大学側で必要となる経費は、年度ごとに国立天文台が同大学と契約を結ぶことによって支払い、これまでの成果物としては設計書が設備備品として納入された。最終成果物としては、設備備品として CHARIS 本体がハワイ観測所に納入される予定である。その他は、ハワイ観測所で開発中の SCE_xAO の経費（PD 研究員の雇用）や、SEEDS による観測、南極望遠鏡、重力マイクロレンズ観測等の活動費に効率的に使用している。

【研究項目 A02】

主な設備としてシミュレーション用の計算機システムと大容量データサーバ、ならびに光化学エアロゾル生成・光学特性実験のための薄膜測定装置と分光高度計システムを導入した。前者は、大気循環や大気放射のシミュレーションモデルの開発、計算の実行、大規模データの解析に活用されている。また後者においては大気化学過程・大気放射過程のモデリングに必要な基礎データの獲得を進めており、有機質エアロゾルの化学組成、生成率、反応経路、光学特性の背景ガス組成に対する依存性が定量化されつつある。人件費のほとんどは 2 名の PD 研究員の雇用に充て、それぞれ大気進化モデリングと大気放射モデルの構築を進めている。成果の一部が Nature 誌に掲載されるなど、PD 研究員による研究は順調な進展を見せている。大学院生を含む研空組織構成員の国内外の学会や研究会参加のための旅費を支出したほか、平成 23 年 12 月にキックオフミーティング（1泊2日）を東京で、平成 24 年 3 月と平成 25 年 3 月には系外惑星大気 WS2012（3日間）、同 WS2013（2日間）それぞれ神戸市と東京において開催した。これにより研究戦略を分担者らと共有し、また大学院生や超高層大気分野や惑星内部物性分野など隣接分野の研究者にも旅費を支出することで、若手育成と研究ネットワークの拡張を図った。

【研究項目 B01】

常時-15°C で運用可能な広さ 15m² のプレハブ低温室を関連研究者の拠点である神戸大に整備した。この設備は、雪及び氷に対する力学物性測定で活用している。また、弾丸を 7km/s まで加速できる 2 段式軽ガス加速装置を導入した。これを低温室に設置した試料チャンバーと組み合わせることで、雪や氷の大試料を用いた衝突回収実験が初めて可能となり、これらの研究推進に有効活用されている。本低温室で行われる力学物性測定や衝突実験の結果は、ダスト付着モデルの改良の他、微惑星衝突破壊によるダスト生成モデルの確立やデブリ円盤観測の解釈にも応用される見込みで、他の研究項目への波及効果も期待できる。

天体観測関連では近赤外線カメラを購入し、これをベースにしたモニタ観測装置は平成 24 年 1 月にファーストライトを迎えた。平成 25 年度は後期から科学観測を開始する見込みで、具体的には、モニタによって地球型惑星形成が期待される円盤内域の物理環境を調べて ALMA 観測立案に活用する他、系外惑星のトランジット観測にも使用し、研究項目 A01 における惑星探査活動と連携させる。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、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、及び ALMA データ解析の中核的設備として活用されており、設置機関外の研究者（本領域に属する研究者を含む）にも幅広く利用されている。以上が物品関連であるが、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人材育成にも活用している。

【研究項目B02】

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ている。平成24年5月には京都大学において、“Revealing Evolution of Protoplanetary Disks in the ALMA Era”と題する国際研究集会を主催し、外国人研究者招聘旅費を支出した。また、研究項目B02のメンバー間の情報交換のため、平成24年2月、平成25年2月の二回にわたって長野県にて各4泊5日の合宿研究会を開き、その旅費も支出した。特に平成25年2月の合宿研究会は研究項目B01、B02合同で行った。このように、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ている。その成果は、59編の国際ジャーナルへの論文発表（投稿中を含む）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は10編（海外機関所属の日本人研究者との論文2編を含む）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は14編となっており、国際共同研究の推進、観測チームとの共同は順調に進んでいる。設備は、平成23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である。前者は、重力不安定性による巨大惑星の形成過程や原始惑星系円盤の進化過程についての数値シミュレーションで目下、有効活用されている。後者に関しては、GRAPE-9用の大規模惑星集積シミュレーションコードを開発し、試験計算として、これまで不可能だった雪線を含むような広域の原始惑星系円盤を考えた、原始惑星の寡占的成長の検証を行っている。さらに製造メーカーと協力して、惑星集積シミュレーション用の重力計算ライブラリの最適化を行い、最新鋭コンピュータによる超大規模シミュレーションの準備が順調に進んでいる。

6. 総括班評価者による評価（2 ページ程度）

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（東北大学・教授・観測天文学）の3氏に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。

このたび、これらの評価担当者に過去2年間の成果の概要を説明したところ、以下の評価コメントを得た。

【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」研究をさらに一步進め、「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下したい。

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^[1]や、重力レンズ法による新たな浮遊惑星候補の発見がなされた^[2] (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^[3] (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（質量的に軽い天体）が形成されてもおかしくないような現場が見つかった^[4] (B01 班)。このような新たな発見をシミュレーションにも反映させていくことにより、ここで挙げた研究の方向性がさらに発展することを期待する。

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、円盤中に含まれるミクロンサイズの固体微粒子（ダスト）から、km 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^[5] (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。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とのことで、今後のさらなる発展を楽しみに見守りたい。

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、円盤物質が如何にして惑星物質が、特に惑星大気や地球型惑星を特徴付けている海に、どう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でいると評価できる^{[6],[7]}。今後は、これらモデルが天文観測によっても検証されること、特に惑星大気分光を可能にする高精度機能を持つ新観測装置（超高精度波面補償光学装置 SCEXAO や、高コントラスト赤外線分光器 CHARIS）の開発に期待したい。開発は順調に進んでいると見受けられるので、ぜひ期間内での系外惑星大気分光の実現を成し遂げて欲しい。

最後に、これらの研究を推進するにあたっての新装置・計算機インフラの充実の重要性に関してもコメントしておきたい。系外惑星の研究は、ある意味で総合的・学際的科学であるので、様々な手法を結集する必要があるためには、いわばナショナルプロジェクトクラスの大型装置だけでなく、特徴ある中小装置群による大型装置を補完する特徴的な観測研究の活躍が欠かせない。本研究領域でもすでに、南極トランジットカメラや低温衝突実験装置、小型赤外線カメラなどが順調に整備されつつあることは高く評価できる。今後の多彩な成果を期待する。計算機シミュレーションも含めたこれら中小規模の設備群の整備活用を通じて、特に、次世代の研究者育成にも励んでいただきたい。

以上を総括すると、現状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上がっていると評価できる。

- [1] Carson, J. et al. 2013, "Direct Imaging Discovery of a "Super-Jupiter" around the Late B-Type Star κ And", *ApJ*, 763, L32
- [2] 論文準備中につき非公開情報
- [3] Ida, S., Lin, D., Nagasawa, M., "Toward a Deterministic Model of Planetary Formation VII: Eccentricity Distribution of Gas Giants", submitted to *ApJ*
- [4] Fukagawa, M. et al., "Mass Concentration within a Protoplanetary Ring: Clear Evidence for Ongoing Planet Formation" preprint.
- [5] Kataoka, A., Tanaka, H., Okuzumi, S., & Wada, K. 2013, "Static Compression of Porous Dust Aggregates", *A&A*, 554, A4 (12 pp.)
- [6] Furuya, K., Aikawa, Y. et al. "Water in Protoplanetary Disks: Deuteration and Turbulent Mixing", submitted to *ApJ*
- [7] *Hamano, K., Abe, Y., & Genda, H., 2013, "Emergence of two types of terrestrial planet on solidification of magma ocean", *Nature*, 497, 607–610, (筆頭著者=本計画研究 PD)

【松井孝典所長】

計画研究 A02 を中心に評価を行った。本計画の内容は「大気循環の数値モデリング」「大気放射モデリング」「大気形成と進化の理論」に大別される。「循環数値モデリング」では、M 型星周りに検出か期待される同期回転湿潤惑星について系統的な大気大循環シミュレーションを行い、暴走温室状態の発生条件を明らかにしつつある。また三成分の可凝結種をすべて考慮した木星の雲対流シミュレーションを成功させ、積乱雲の発生サイクルの周期か大気重元素濃度と高い相関を持つことを発見した。「放射モデリング」においては、スペクトル計算だけでなく、大気層の加熱冷却率を求めることで、大気循環との相互作用の解明を進めており、有機質エアロゾルの生成と光学特性の実験的研究と併せて、系外惑星の大気構造について信頼性の高い予測を行うことが可能になりつつある。「形成進化理論」に関しては、大気進化の素過程である流体力学的大気散逸について従来の理解を覆す成果を得、また、系外地球型惑星の類型について新理論を提唱した。後者は、ハビタブルゾーンの内縁からやや中心星寄りの軌道を持つ地球型惑星は、その形成から 10 億年間にも渡ってマグマオーシャンを保持する可能性を示すもので、世界的注目を集めている。以上のように良好な成果が生まれていることから、本計画研究は順調に進展していると判断できる。大規模数値計算技術の講習会や、トップレベルの海外研究者との交流など、若手育成の活動も充実している。今後は系外惑星大気の統合的な描像を構築するとともに、観測班の得るデータとの対比研究が進むことを期待する。

【山田亨教授】

「太陽系外惑星」という新学術領域を確立する研究について、系外惑星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、光赤外および電波での観測、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に進められている点は、高く評価される。

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すすめられており、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ている。今後は、計画研究 B02 の惑星形成論の進展と融合した新たな知見の獲得の進展も期待される。高コントラスト赤外線分光器の開発も着実に進められており最終設計が進んでいる点について高く評価される。すばるドップラー分光器による観測研究、南極望遠鏡用装置開発については本新学術研究で達成しうる課題とマイルストーンをより明確にして進展させることを期待したい。重力レンズによる地球質量、スーパーアースの探査は着実な成果を挙げたと評価される。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ており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ている。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中心星紫外光の条件によるモデルを構築し地球と金星との相違を説明しうる理論を提唱するなど大きな成果を挙げた。系外惑星をターゲットにしたエアロゾルの生成と特性についての実験の成果についてはさらに具体的な成果の記述が期待されるだろう。A02 研究でも様々な成果が生まれており全体として高く評価されるが、現在得られつつある観測的成果との比較や今後の観測計画への展開など、A01 研究との相乗効果による発展を期待したい。計画研究 B01 では、まず、ALMA による円盤研究の成果が挙げられており、今後さらなる発展が見込まれる。SEEDS プロジェクトをはじめとして成果を挙げているすばる望遠鏡での散乱光

観測などとの相補的発展もさらに追求すべきである。宇宙研カメラについては、本新学術研究で達成しうる課題とマイルストーンをより明確にして進展させることを期待したい。一方、円盤内固体物質の成長については実験・理論の構築が進んでいるが、円盤における微惑星成長過程の新しい知見につなげる展開を期待したい。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。

公募研究の実施、計7件にのぼる国内・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は高く評価される。今後は、系外惑星観測、原始惑星系円盤観測を着実に進展させるとともに、新しい観測装置・手法による研究の展開を明確なスケジュールのマイルストーンをもって着実に進めることが期待される。また、総括班に対しては、ここまで進められてきた惑星形成・惑星大気の理論・シミュレーション研究と今後期待される発展をより多角的な角度から検証し、観測的研究成果と併せて総合的に惑星形成論の新たな知見・描像を描き出すため、研究交流のさらなる活性化をすすめることを期待したい。とくに、地球惑星科学的な研究の融合と発展については、より具体的な研究の方向性を明確にすることも必要だろう。

7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・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。

【研究項目 A01】

(1) すばる望遠鏡によるガス惑星や円盤の直接撮像観測

本計画研究によるガス惑星の直接検出例としては、これまでに確実なものが1個発見された。またこれ以外にも候補天体がいくつか検出されており（注1）、現在確認中である。確実な1個については、 κ And星の周囲に発見したもの（図7-1）で、中心星から55天文単位離れており、我々の太陽系サイズと同程度の範囲に発見したといえる（林、高遠ら）。この惑星の質量は木星の13倍、表面温度は1700Kである。またB01班との連携により、多数の原始惑星系円盤の直接撮像にも成功しており、興味深い結果が得られている。その一例として、円盤中央部の穴をまたいで伸びる腕の発見を図7-2に示す。理論研究からは、腕の中に形成中の惑星が存在しているものと示唆される。

(2) ガス惑星の直接分光観測を目的とした専用装置群の開発・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・製作が、ほぼ当初計画通りに進捗している（ギュヨン、高遠ら）。CHARISはプリンストン大学との共同研究で、またSCExAOは国立天文台ハワイ観測所で開発・製作中である。SCExAOで採用している高効率コロナグラフPIAAは、研究分担者ギュヨンのオリジナルアイデアであり、学術論文として発表している他、NASAが検討している系外惑星直接撮影衛星などへの採用が検討されている。

(3) 地球型惑星の間接検出

重力マイクロレンズ法による系外惑星検出観測については、2012年と2013年のシーズンを終えて、それぞれ4個と6個の系外惑星を発見した（注2）。また、この他に合計10個の浮遊惑星（主星を持たない孤立した低質量天体）候補も検出した（住ら）。

【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

オープンソース開発を進めている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/>）。同期回転惑星の3D数値大気シミュレーションを、日射条件など多様な境界条件を系統的に与えて行った結果、大気水蒸気量がその飽和蒸気圧に従う湿潤大気条件下では、昼半球からの惑星放射の上限が射出限界に規定され、日射加熱の余剰分が夜半球に運ばれる熱循環パターンが広い境界条件下で出現することを見出した（図1）。また複数の可凝結種をすべて考慮した木星の雲対流の数値実験を世界で初めて成功させ、積乱雲の発生の間欠性と凝結成分の濃度の間に強い相関関係があることを発見した。さらに高圧二酸化炭素大気における雲対流の数値実験により、二酸化炭素氷雲が安定に滞留する解を見出した。これは二酸化炭素氷雲による温室効果により、ハビタブルゾーンの外側境界が拡大する可能性を示唆する。（倉本ら）。

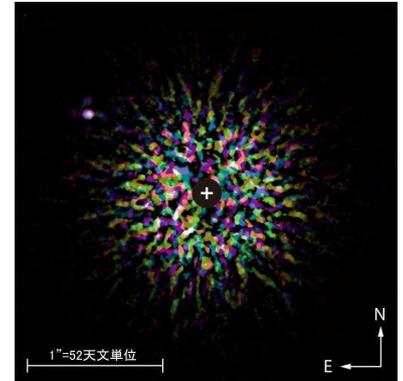


図7-1：直接撮像した κ And星のガス惑星（左上の小さい点）。（Carson et al. 2013）

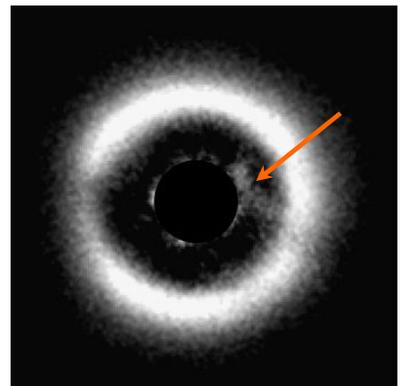


図7-2：さそり座 J1604星の円盤の穴の中に発見された腕構造（矢印）。円盤の直径は約120天文単位（Mayama et al. 2013）

(2) 系外惑星の大気進化の多様性の解明

中心星放射の増大と水蒸気の宇宙空間への散逸を考慮し、惑星集積期以降の惑星表層環境の進化経路について理論的に解明した(図7-3)。惑星集積過程を終えた地球型惑星は、軌道上での中心星放射の強さによって水蒸気が地表で凝結するものと、しないものの二タイプに類型化できる。前者は地表に液体の水を長期間保持するのに対し、後者のタイプの惑星は、形成から約10億年もの長期にわたり、地表の岩石が融解したマグマオーシャン状態が持続し、その間に中心星 EUV 放射による大気上層の水蒸気の分解散逸を受けて大部分の H₂O を失う。本計画研究 PD を筆頭著者とする本成果は Nature 誌に掲載され(濱野 [本経費の PD 研究員]、阿部らによる)、News and Views 欄に取り上げられるなど、系外地球型惑星の表層環境に対する新予想として高評価を得た。また大気進化の重要なメカニズムの一つである流体力学的大気散逸について、現実的な散逸率は既往研究よりも数十倍高いことを明らかにした(林ら)。有力視されてきた既往研究は、著しい数値誤差を含んでいたことが判明し、今後の大気進化モデリングにインパクトを持つ結果となった。

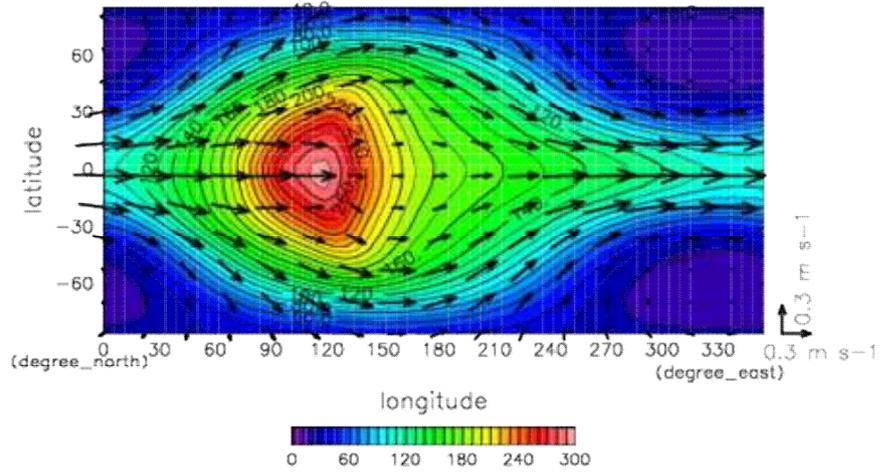


図7-3：全球 3D 大気循環数値モデル DCPAM で再現された同期回転惑星の鉛直積分水蒸気量(カラー)と鉛直積分水蒸気フラックス(ベクトル)。

本計画研究 PD を筆頭著者とする本成果は Nature 誌に掲載され(濱野 [本経費の PD 研究員]、阿部らによる)、News and Views 欄に取り上げられるなど、系外地球型惑星の表層環境に対する新予想として高評価を得た。また大気進化の重要なメカニズムの一つである流体力学的大気散逸について、現実的な散逸率は既往研究よりも数十倍高いことを明らかにした(林ら)。有力視されてきた既往研究は、著しい数値誤差を含んでいたことが判明し、今後の大気進化モデリングにインパクトを持つ結果となった。

(3) 系外惑星のキャラクタリゼーションと解釈

地球型惑星とガス惑星双方の大気放射モデルを、循環シミュレーションの解釈に応用し、湿潤な同期回転惑星においては水蒸気大気の射出限界が昼夜間熱輸送を決めるもっとも支配的な要因であること、木星型惑星においては成層圏の成層が弱く、放射活性物質の供給に対流圏からの擾乱が重要な役割を果たす可能性が示された。また出発ガス組成を様々に取ったエアロゾル生成実験と、気相ラジカル種の生成をシミュレートする光化学モデルの比較から、有機質エアロゾルの生成経路について明らかにしつつある。ここからエアロゾルの光化学的生成、材料物質の消費、放射加熱間のフィードバック過程によって、各成分の上層大気における存在度が一定の範囲に定まる可能性が示された。これらは A01 班が最終年度にデータ獲得を目指す系外ガス惑星大気の観測量予測と解釈に貢献する(はしもと、倉本、関根ら)。

【研究項目 B01】

(1) 円盤構造の解明

ALMA による原始惑星系円盤(HD142527)の観測の結果、ダスト放射輝度の極めて高い領域を中心星から約150 AU 離れた場所に見出した(図3-1)。ガス輝線データからダスト温度を推定しその柱密度を見積り、自己重力によって自発的に惑星形成が起こりうるほど高密度である可能性を指摘した(百瀬、深川ら)。一方、A01 班との共同研究として、すばる望遠鏡 SEEDS プロジェクトで10以上の原始惑星系円盤を観測し、太陽系サイズ程度の領域(30AU 以遠)で近赤外ダストからの散乱光の直接撮像に成功した。その結果、複数の円盤で未検出の惑星に起因すると解釈できる溝状や非軸対称の構造を検出した(記者発表4件。図7-2も参照)。装置開発面では、円盤の時間変動現象を検出するための近赤外線カメラを開発し、宇宙科学研究所屋上望遠鏡にて性能評価を進めた。

(2) 円盤内固体物質の組成や成長の解明

ダスト成長に関する数値計算により、ダスト成長初期段階においては衝突圧縮が非効率的なため、高空隙率・低密度な氷天体がまず形成されることを示した。さらにガス動圧や自己重力による圧縮効果を詳細に調べ、天体サイズが約100m 以上になるとガス動圧の影響が、km サイズ以上では自己重力の影響がそれぞれ顕著となり、最終的に密度 0.1g cm^{-3} 以上にまで圧縮されることを初めて明らかにした(田中ら)。一方、惑星物質物性に基づく理論研究では、浮遊法を用いた融解粒子の室内実験結果を解析した結果、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)で起ることを示し、あわせて結晶形態の冷却条件依存性を包括的に調べた(山本ら)。また実験からは、空隙率40%から80%の氷ダスト集合体の衝突付着条件を衝突速度 $0.4\sim 4.4\text{m/s}$ で調べ

た。その結果、空隙率 60%以下では跳ね返り、空隙率 70%以上では付着・無反発となることを明らかにした。さらに、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（荒川ら）。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、惑星形成領域における巨大衝突に起因している可能性を指摘した（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の結果をまとめ、論文発表した。また、地球の海水における HDO と H₂O 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/H₂O 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。この結果はすでに学会発表し、論文を投稿中である（相川ら）。

【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が出ている。

(1) 星惑星形成過程の理論モデルの構築

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た（犬塚ら）。中心星が木星質量程度の小さなときから円盤が形成され、巨大ガス惑星が円盤分裂によって多数形成されて中心星に落ちて行くという描像（図 7-4）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。

(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・軌道進化を無矛盾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空気力学的特性の変化が氷の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。これは本研究計画で雇用されている小林、及び研究項目 B01 の分担者田中との共同研究である。

(3) 星・惑星形成の観測と理論モデルの比較検討

系外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）。同時に、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。さらに、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）。

赤外線観測によって円盤表面に氷粒子を見出す原理を明らかにし、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。また、中心星からの紫外線によって氷粒子が壊されて失われる可能性を明らかにし、中心星の性質（スペクトルタイプ）に応じて、氷微粒子が壊されるか否かが分かれることがわかった（中本ら）。

原始惑星系円盤中の詳細な輻射輸送及び化学反応計算に基づき、赤外線宇宙望遠鏡ハーシェルや大型電波干渉計 ALMA による最新の分子輝線観測より、円盤内のダストの合体成長および円盤ガス散逸に関する物理構造を検証する方法を提案した（野村ら）。こ

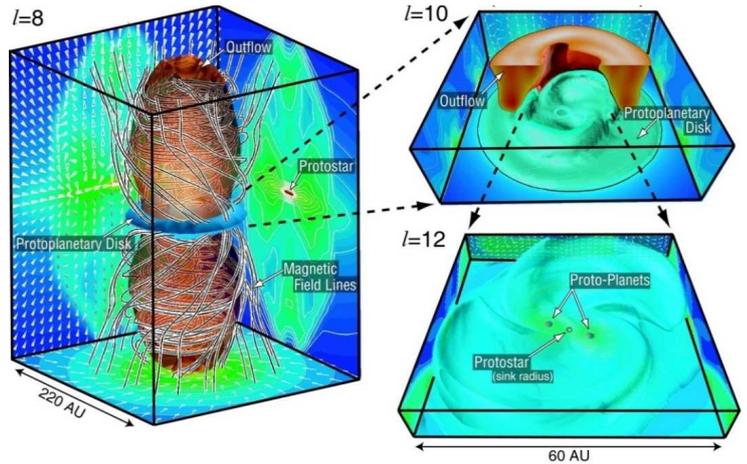


図 7-4：原始星及び原始惑星系円盤の形成過程のシナリオの模式

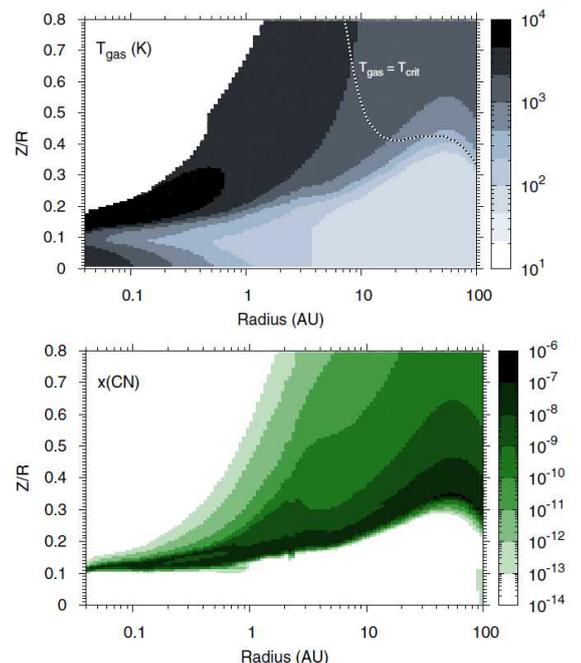


図 7-5：近傍の大質量星に照射された原始惑星系円盤中の光蒸発可能領域 ($T_{\text{gas}} > T_{\text{crit}}$) (左) と CN 分子の分布 (右)。CN 分子輝線の観測により、光蒸発の検証が可能。

れは、B01 班の相川との共同研究である。

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)。前者では、微惑星の蒸発によって原始エンベロープが汚染されることを考慮すると、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。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、観測により明らかになってきた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。

(3) 系外地球型惑星の形成進化の理論モデルの構築

系外地球型惑星については、先に述べた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)。

【公募研究】

公募研究では、計画研究ではカバーしきれない分野や、萌芽的な分野の研究が着実に進められている(研究課題については「2. 研究組織」の『研究項目と公募研究の関係』を参照)。

たとえば、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は 3×10^{-7} のコントラストを達成した(村上)。

また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)。あるいは、多重格子法を用いた3次元高解像度数値流体シミュレーションにより、原始惑星系円盤から周惑星円盤へのガス降着流の構造を詳細に調べた結果、降着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)。

8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（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。論文の場合、計画研究・公募研究毎に順に記載し、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。また、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】（全て査読有、主要な研究成果に基づく論文発表のみ抜粋）

2013 年 1 月・現在（印刷中含む）

- *Guyon, O., Hinz, P. H., Cady, E., Belikov, R., Martinache, F., 2013, High Performance Lyot and PIAA Coronagraphy for Arbitrarily shaped Telescope Apertures, The Astrophysical Journal, accepted for publication, (2013arXiv1305.6686G)
- *Guyon, O., ... (全 15 名), 2013, Simultaneous Exoplanet Characterization and Deep Wide-field Imaging with a Diffractive Pupil Telescope, The Astrophysical Journal, ApJ, 767, 11
- *Carson, J. ..., Hayashi, M. ... (全 56 名), 2013, Direct Imaging Discovery of a "Super-Jupiter" around the Late B-type Star κ And, Astrophys. J., Letter, 76, L32, DOI: 10.1088/2041-8205/763/2/L32
- *Thalmann, C. ..., Momose, M. ..., Hayashi, M. ... (全 49 名), 2013, Imaging Discovery of the Debris Disk around HIP 79977, Astrophys. J., Letters, 763, L29, DOI: 10.1088/2041-8205/763/2/L29
- *Grady, C. A. ..., Hayashi, M. ... (全 74 名), 2013, Spiral Arms in the Asymmetrically Illuminated Disk of MWC 758 and Constraints on Giant Planets, Astrophys. J., 762, 48, DOI: 10.1088/0004-637X/762/1/48
- *Shimonishi, T. ..., Sakon, I. ... (全 5 名), 2013, AKARI Infrared Camera Survey of the Large Magellanic Cloud. II. The Near-infrared Spectroscopic Catalog, Astron. J., 145, 2, DOI: 10.1088/0004-6256/145/2/32
- *Street, R. A. ..., Sumi, T. ... (全 137 名), 2013, MOA-2010-BLG-073L: An M-dwarf with a Substellar Companion at the Planet/Brown Dwarf Boundary, Astrophys. J., 763, 67
- *Bensby, T. ..., Sumi, T. ... (全 22 名), 2013, Chemical evolution of the Galactic bulge as traced by microlensed dwarf and subgiant stars. V. Evidence for a wide age distribution and a complex MDF, Astron & Astrophys, 549, A147, DOI: 10.1051/0004-6361/201220678

2012 年 1 月-12 月

- *Mayama, S. ..., Hayashi, M. ... (全 55 名), 2012, Subaru Imaging of Asymmetric Features in a Transitional Disk in Upper Scorpius, Astrophys. J., Letters, 760, L26, DOI: 10.1088/2041-8205/760/2/L26
- *Dong, R. ..., Hayashi, M. ... Takato, N. ... (全 52 名), 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., ... (全 55 名), 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, DOI: 10.1088/2041-8205/758/1/L19
- *Kusakabe, N. ..., Hayashi, M., Takato, N., ... (全 55 名), 2012, High-contrast Near-infrared Polarization Imaging of MWC480, Astrophys. J., 753, 153, DOI: 10.1088/0004-637X/753/2/153
- *Muto, T., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N. ... (全 60 名), 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, DOI: 10.1088/2041-8205/748/2/L22
- *Sasada, M. ..., Sakon, I. ... (全 13 名), 2012, Multi-Wavelength Photometric and Polarimetric Observations of the Outburst of 3C 454.3 in 2009 December, Publications of the Astronomical Society of Japan, 64, 58
- *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, 1288-1294
- *Boccaletti, A. ..., Guyon, O. ... (全 29 名), 2012, SPICES: spectro-polarimetric imaging and characterization of exoplanetary systems. From planetary disks to nearby Super Earths, Experimental Astronomy, 34, 355-384, DOI: 10.1007/s10686-012-9290-5
- *Kawahara, H. ..., Guyon, O. ... (全 7 名), 2012, Can Ground-based Telescopes Detect the Oxygen 1.27 μ m Absorption Feature as a Biomarker in Exoplanets? Astrophys. J., 758, 113
- *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, 918, 861-867

- *Guyon, O. ... (全 14 名), 2012, High-precision Astrometry with a Diffractive Pupil Telescope, *Astrophys. J., Supplement*, 200, 1, DOI: 10.1088/0067-0049/200/2/11
- *Dong, R. ..., Guyon, O. ..., Hayashi, M. ..., Takato, N. ... (全 54 名), 2012, The Missing Cavities in the SEEDS Polarized Scattered Light Images of Transitional Protoplanetary Disks: A Generic Disk Model, *Astrophys. J.*, 750, 161
- *Bachelet, E. ..., Sumi, T. ... (全 123 名), 2012, A brown dwarf orbiting an M-dwarf: MOA 2009-BLG-411L, *Astron & Astrophys.*, 547, A55, DOI: 10.1051/0004-6361/201219765
- *Bennett, D. P. ..., Sumi, T. ... (全 25 名), 2012, Planetary and Other Short Binary Microlensing Events from the MOA Short-event Analysis *Astrophys. J.*, 757, 19, DOI: 10.1088/0004-637X/757/2/119
- *Choi, J.-Y. ..., Sumi, T. ... (全 125 名), 2012, A New Type of Ambiguity in the Planet and Binary Interpretations of Central Perturbations of High-magnification Gravitational Microlensing Events, *Astrophys. J.*, 756, 48, DOI: 10.1088/0004-637X/756/1/48
- *Bozza, V. ..., Sumi, T. ... (全 105 名), 2012, OGLE-2008-BLG-510: first automated real-time detection of a weak microlensing anomaly - brown dwarf or stellar binary?, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 424, 902-918
- *Yee, J. C. ..., Sumi, T. ... (全 79 名), 2012, MOA-2011-BLG-293Lb: A Test of Pure Survey Microlensing Planet Detections, *Astrophys. J.*, 755, 102, DOI: 10.1088/0004-637X/755/2/102
- *Bachelet, E. ..., Sumi, T. ... (全 126 名), 2012, MOA 2010-BLG-477Lb: Constraining the Mass of a Microlensing Planet from Microlensing Parallax, Orbital Motion, and Detection of Blended Light, *Astrophys. J.*, 754, 73, DOI: 10.1088/0004-637X/754/1/73
- *Kubas, D. ..., Sumi, T. ... (全 22 名), 2012, A frozen super-Earth orbiting a star at the bottom of the main sequence, *Astron & Astrophys*, 540, A78, DOI: 10.1051/0004-6361/201015832
- *Cassan, A. ..., Sumi, T. ... (全 41 名), 2012, One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations, *Nature*, 481, 7380, 167-169, DOI: 10.1038/nature10684
- *Kiriyama, Y. ..., Fujiwara, H. ... (全 6 名), 2012, Debris Disks Explored by Akari and Irsf Publications of The Korean Astronomical Society, 27, 181-182, DOI: 10.5303/PKAS.2012.27.4.181
- *Honda, M. ..., Sakon, I., Fujiwara, H. ... (全 15 名), 2012, Mid-infrared Imaging of the Transitional Disk of HD 169142: Measuring the Size of the Gap, *Astrophys. J.*, 752, 143, DOI: 10.1088/0004-637X/752/2/143
- [2011年7月-2011年12月](#)
- *Thalmann, C.... (全 51 名), 2011, Images of the Extended Outer Regions of the Debris Ring around HR4796A, *Astrophys. J., Letters*, 743, L6-L6, DOI: 10.1088/2041-8205/743/1/L6

【主な論文一覧：計画研究 A02】 (全て査読有、主要な研究成果に基づく論文発表のみ抜粋)

[投稿中](#)

- *Goto, K.T., Sekine, Y., Suzuki, K., Tajika, E., Senda, R. et al., Redox conditions in the atmosphere and shallow marine environments during the first Huronian deglaciation: insights from Os isotopes and redox-sensitive elements, *Earth Planet. Sci. Lett.*, submitted
- *Kurosawa, K., Sugita, S., Ishibashi, K., Hasegawa, S., Sekine, Y. et al., Hydrogen cyanide production due to mid-size impacts in a redox-neutral N₂-rich atmosphere, *Origins Life Evol. Biosphere*, submitted
- *Sugiyama, K., Nakajima, K., Odaka, M., Kuramoto, K., and Hayashi, Y.-Y., Numerical Modeling of Cloud Convection in Jupiter's Atmosphere: robustness and mechanism of the intermittent emergence of vigorous cumulonimbus clouds, *Icarus*, submitted.

[2013年1月-現在 \(印刷中含む\)](#)

- *Hamano, K., Abe, Y., and Genda, H., 2013, Emergence of two types of terrestrial planet on solidification of magma ocean, *Nature*, 497, 607-610 (筆頭著者は本計画研究 PD)
- *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.*, accepted for publication
- *Komatsu, G., Kumar, P.S., Goto, K., Sekine, Y., Giri, C., and Matsui T., 2013, Drainage systems of Lonar Crater, India: Contributions to Lonar Lake hydrology and crater degradation, *Planet. Space Sci.*, accepted for publication
- *Sekine, Y., Takano, Y., Yano, H., Funase, R., Takai, K., Ishihara, M., Shibuya, T., Tachibana, S., Kuramoto,

K., Yabuta, H., Kimura, J., and Furukawa, Y., 2013, Exploration of Enceladu' water-rich plumes toward understanding of chemistry and biology of the interior ocean, 29th Proc. of ISTS, accepted for publication
[2012年1月-12月](#)

- *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. and Gtool development group, 2012, "Gtool5": a Fortran90 library of input/output interfaces for self-descriptive multi-dimensional numerical data, *Geosci. Model Dev.*, 5, 449-455
- *Kamata, S., Sugita, S., and Abe, Y., 2012, A new spectral calculation scheme for long-term deformation of Maxwellian planetary bodies, *J. Geophys. Res.*, 117, E02004
- *Matsui, H., Iwagami, N., Hosouchi, M., Ohtsuki, S., and Hashimoto, G. L., 2012, Latitudinal distribution of HDO abundance above Venus' clouds by ground-based 2.3 um spectroscopy, *Icarus*, 217, 610-614
- *Nakajima, K., Yamada, Y., Ishiwatari, M., and Hayashi, Y. -Y., 2012, Dependence of equatorial precipitation activity on the vertical profile of radiative cooling in an aqua-planet, *Nagare Multimedia* 2012
- *Sekine, Y., and Genda, H., 2012, Giant impacts in the Saturnian system: a possible origin of diversity in the inner mid-sized satellites, *Planet. Space Sci.* 63-64, 133-138,
- *Taguchi, M., Fukuhara, T., Futaguchi, M., Sato, M., Imamura, T., Mitsuyama, K., Nakamura, M., Ueno, M., Suzuki, M., Iwagami, N., and Hashimoto, G. L., 2012, Characteristic features in Venus' nightside cloud-top temperature obtained by Akatsuki/LIR, *Icarus*, 219, 502-504

[2011年7月-12月](#)

- *Ishimaru, R., Sekine, Y., Matsui, T., Mousis, O., 2011, Oxidizing proto-atmosphere on Titan: constraint from N₂ formation by impact shock, *Astrophys. J. Lett.*, 741, L10, 1-6
- *Sekine, Y., Suzuki, K., Senda, R., Goto, K.T., Tajika, E., Tada, R. Goto, K., Yamamoto, S., Ohkouchi, N., Ogawa, N.O., Maruoka, T., 2011, Osmium evidence for synchronicity between a rise of atmospheric oxygen and Palaeoproterozoic deglaciation, *Nature Comm.*, 2:502, 1-6

【主な論文一覧：研究項目 B01】(全て査読有、主要な研究成果に基づく論文発表のみ抜粋)

[投稿中](#)

- *Kenji Furuya, Yuri Aikawa, Hideko Nomura, Franck Hersant, and Valentine Wakelam, 2013, Water in protoplanetary disks: Deuteration and turbulent mixing, *The Astrophysical Journal*, submitted

[2013年1月-現在](#)

- *Fujiwara, H., ... , Onaka, T. ..., Kataza, H. ...Fukagawa, M. (全9名), 2013, AKARI/IRC 18 μm survey of warm debris disks, *Astronomy and Astrophysics*, 550, A45 (15 pp), DOI: 10.1051/0004-6361/201219841
- *K. K. Tanaka, T. Yamamoto, H. Tanaka, H. Miura, M. Nagasawa, and T. Nakamoto, 2013, Evaporation of Icy Planetesimals due to Planetesimal Bow Shocks *The Astrophysical Journal*, 764, 120(11pp)
- *A. Kataoka, H. Tanaka, S. Okuzumi, K. Wada, 2013, Static compression of porous dust aggregates, *Astronomy & Astrophysics*, 554, A4, DOI: 10.1051/0004-6361/201321325

[2012年1月-12月](#)

- *Fujiwara, H., Onaka, T., Yamashita, T., Ishihara, D., Kataza, H., Fukagawa, M., Takeda, Y., Murakami, H., 2012, Silica-rich Bright Debris Disk around HD 15407A, *The Astrophysical Journal*, 749, L29 (5pp)
- *Aikawa, Y., Kamuro, D., Sakon, I., Itoh, Y., Terada, H., Noble, J. A., Pontoppidan, K. M., Fraser, H. J., Tamura, M., Kandori, R., Kawamura, A., Ueno, M., 2012, AKARI observations of ice absorption bands towards edge-on young stellar objects, *Astronomy & Astrophysics*, 538, A57
- *Aota T. & Aikawa, Y., Phosphorus Chemistry in the Shocked Region L1157 B1, 2012, *The Astrophys. J.*, 761, 74-83, DOI: 10.1088/0004-637X/761/1/74
- *Aikawa, Y., Wakelam V., Hersant, F., Garrod R. T., Herbst E., 2012, From Prestellar to Protostellar Cores II. Time Dependence and Deuterium Fractionation, *The Astrophysical Journal*, 760, 40-58
- *Furuya, K., Aikawa, Y., Tomida, K., Matsumoto T., Saigo K., Tomisaka, K., Hersant, F. Wakelam V., 2012, Chemistry in the First Hydrostatic Core Stage by Adopting Three-dimensional Radiation Hydrodynamic Simulations, *The Astrophysical Journal*, 758, 86-105, DOI: 10.1088/0004-637X/758/2/86
- *Muto, T., Grady, C. A., Hashimoto, J., Fukagawa, M., Hornbeck, J. B. ..., Momose, M. ... (全57名), 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, 2012, L22 (7 pp)
- *Fujiwara, H., Onaka, T., Takita, S., Yamashita, T., Fukagawa, M., Ishihara, D., Kataza, H., and Murakami, H., 2012, The Absence of Cold Dust around Warm Debris Disk Star HD 15407A, *The Astrophysical Journal Letters*, 759, L18 (5 pp), DOI: 10.1088/2041-8205/759/1/L18
- *Onaka, T., 2012, AKARI Observations of the Interstellar Medium, *Publications of The Korean Astronomical Society*, 4, 187-193, DOI: 10.5303/PKAS.2012.27.4.187
- *T. Suyama, K. Wada, H. Tanaka, S. Okuzumi, 2012, Geometric Cross Sections of Dust Aggregates and a Compression Model for Aggregate Collisions, *The Astrophysical Journal*, 753, 115(10pp)
- *S. Okuzumi, H. Tanaka, H. Kobayashi, K. Wada, 2012, Rapid Coagulation of Porous Dust Aggregates outside the Snow Line: a Pathway to Successful Icy Planetesimal Formation, *The Astrophysical Journal*, 752, 106(18pp)
- *H. Tanaka, K. Wada, T. Suyama, S. Okuzumi, 2012, Growth of Cosmic Dust Aggregates and Reexamination of Particle Interaction Models, *Prog. of Theor. Phys. Suppl.*, 195, 101-113, DOI: 10.1143/PTPS.195.101
- *山本哲生, 2012, 微小重力と惑星科学, *JASMA*, Vol. 29, No. 4, 161-162
- *Tanii, R., Itoh, Y., Kudo, T., Hioki, T., Oasa, Y. ...Muto, T. ..., Fukagawa, M. ...Momose, M. ... (全 60 名), 2012, High-Resolution Near-Infrared Polarimetry of a Circumstellar Disk around UX Tau A, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64, 124 (1-10)
- *Shimaki, Y., and Arakawa, M., 2012, Low-velocity collisions between centimeter-sized snowballs: porosity dependence of coefficient of restitution for ice aggregates analogues in the solar system, *Icarus*, 221, 310-319 DOI: 10.1016/j.icarus.2012.08.005
- *Shimaki, Y., and Arakawa, M., 2012, Experimental study on collisional disruption of highly porous icy bodies, *Icarus*, 218, 737-750

2011年7月-12月

- *Akiyama, E., Momose, M., Hayashi, H., Kitamura, Y., 2011, Thermal Structure of a Protoplanetary Disk around HD 163296: A Study of Vertical Temperature Distribution by CO Emission Lines, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 63, 1059-1069
- *Koji Wada, Hidekazu Tanaka, Toru Suyama, Hiroshi Kimura, and Tetsuo Yamamoto, 2011, The Rebound Condition of Dust Aggregates Revealed by Numerical Simulation on Their Collisions, *The Astrophysical Journal*, 737, 36 (11pp), DOI: 10.1088/0004-637X/737/1/36
- *Arakawa, M. and Yasui, M., 2011, Impact crater on sintered snow surface simulating porous icy bodies, *Icarus*, 216, 1-9
- *Kato, E., Fukagawa, M., Perrin, M. D., Shibai, H., Itoh, Y., Ootsubo, T., 2011, Near- and Mid-Infrared Imaging Study of Young Stellar Objects around LkHa 234, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 63, 849-860
- *Furuya, K., Aikawa, Y., Sakai, N., Yamamoto, S., 2011, Carbon Isotope and Isotopomer Fractionation in Cold Dense Cloud Cores, *The Astrophysical Journal*, 731, 38 (10pp), DOI: 10.1088/0004-637X/731/1/38

【主な論文一覧：研究項目 B02】(全て査読有、主要な研究成果に基づく論文発表のみ抜粋)

2013年1月-現在 (印刷中含む)

- *Okuzumi, S. & Ormel, C. W., 2013, The Fate of Planetesimals in Turbulent Disks with Dead Zones. I. The Turbulent Stirring Recipe., *Astrophys. J.*, accepted for publication
- *Ormel, C. W. & Okuzumi, S., 2013, The Fate of Planetesimals in Turbulent Disks with Dead Zones. II. Limits on the Viability of Runaway Accretion, *Astrophys. J.*, accepted for publication
- *Matsumura, S., Ida, S. & Nagasawa, M., 2013, Effects of Dynamical Evolution of Giant Planets on Survival of Terrestrial Planets, *Astrophys. J.*, 767, 129(14pp)
- *Brasser, R., Ida, S. & Kokubo, E., 2013, A dynamical study on the habitability of terrestrial exoplanets - I. Tidally evolved planet-satellite pairs, *MNRAS*, 428, 1673-1685
- *Takahashi, S. Z., Machida, M. N. & Inutsuka, S., 2013, A Semi-Analytical Description for Formation and Gravitational Evolution of Protoplanetary Disks, *Astrophys. J.*, 770, 71(10pp)
- *Kataoka, A., Tanaka, H., Okuzumi, S. & Koji, W., 2013, Static compression of porous dust aggregates *Astron. Astrophys.*, 554, A4 (12pp)

- *Maruyama, S., Ikoma, M., Genda, H., Hirose, K., Yokoyama, T., & Santosh, M, 2013, The Naked Planet Earth: Most Essential Pre-requisite for the Origin and Evolution of Life, *Geoscience Frontiers*, 4, 141-165
- *Narita, N., Fukui, A., Ikoma, M. ... (全 20 名), 2013, Multi-Color Transit Photometry of GJ 1214b through BJHKs-Bands and a Long-Term Monitoring of the Stellar Variability of GJ 1214, *Astrophys. J.*, submitted
- *Fukui, A., Narita, N., Kurosaki, K., Ikoma, M. ... (全 15 名), 2013, Optical-to-Near-Infrared Simultaneous Observations for the Hot Uranus GJ3470b: A Hint for Cloud-free Atmosphere, *Astrophys. J.*, 770, 95
- *Narita, N., Nagayama, T., Suenaga, T., Fukui, A., Ikoma, M., Nakajima, Y., Nishiyama, S., & Tamura, M., 2013, IRSF SIRIUS JHKs Simultaneous Transit Photometry of GJ 1214b, *PASJ*, 65, 27
- *Tanaka, K. K., Yamamoto, T., Tanaka, H., Miura, H., Nagasawa, M., and Nakamoto, T., 2013, Evaporation of Icy Planetesimals Due to Bow Shocks, *Astrophys. J.*, 764, 120(11pp)
- *Kurokawa, H. and Nakamoto, T., 2012, Effects of Atmospheric Absorption of Incoming Radiation on Radiation Limit of the Troposphere. *J., Atmospheric Sciences*, 69, 403 - 413
- *Sato, B. ..., Nagasawa, M. ... Ida, S. ... (全 13 名), 2013, A Double Planetary System around the Evolved Intermediate-Mass Star HD 4732, *Astrophys. J.*, 762, 9(7pp)
- *Walsh, C., Millar, T. J., Nomura, H., 2013, Molecular Line Emission from a Protoplanetary Disk Irradiated Externally by a Nearby Massive Star, *Astrophys. J.*, 766, L23 (8pp)
- [2012 年 1 月-12 月](#)
- *Walsh, C., Nomura, H., Millar, T. J., Aikawa, Y., 2012, Chemical Processes in Protoplanetary Disks. II. On the Importance of Photochemistry and X-Ray Ionization, *Astrophys. J.*, 747, 114(19pp)
- *Umebayashi, T., Katsuma, S., Nomura, H., 2013, Effects of Dust Growth and Settling on the Ionization by Radionuclides. I. Formulation and Results in a Quiescent State of Protoplanetary Disks, *Astrophys. J.*, 764, 104(21pp)
- *Matsumoto, Y., Nagasawa, M. & Ida, S., 2012, The orbital stability of planets trapped in the first-order mean-motion resonances, *Icarus*, 221, 624-631
- *Ormel, C. W., Ida, S. & Tanaka, H., 2012, Migration Rates of Planets due to Scattering of Planetesimals, *Astrophys. J.*, 758, 80(17pp)
- *Kobayashi, H., Ormel, C. W. & Ida, S., 2012, Rapid Formation of Saturn after Jupiter Completion, *Astrophys. J.*, 756, 70(17pp)
- *Takeuchi, T. & Ida, S., 2012, Minimum Dust Abundances for Planetesimal Formation via Secular Gravitational Instabilities, *Astrophys. J.*, 749, 89(8pp).
- *Kato, M. T., Fujimoto, M. & * Ida, S., 2012, Planetesimal Formation at the Boundary between Steady Super/Sub-Keplerian Flow Created by Inhomogeneous Growth of Magnetorotational Instability, *Astrophys. J.*, 747, 11(10pp)
- *Genda, H., Kokubo, E. & Ida, S., 2012, Merging Criteria for Giant Impacts of Protoplanets, *Astrophys. J.*, 744, 137(8pp)
- *Takeuchi, T., Muto, T., Okuzumi, S., Ishitsu, N. & Ida, S., 2012, Induced Turbulence and the Density Structure of the Dust Layer in a Protoplanetary Disk, *Astrophys. J.*, 744, 101(16pp)
- *Michikoshi, S., Kokubo, E., & Inutsuka, S., 2012, Secular Gravitational Instability of a Dust Layer in Shear Turbulence, *The Astrophysical Journal*, 746, 35(12pp)
- *Inutsuka, S., 2012, Present-Day Star Formation – From Molecular Cloud Cores to Protostars and Protoplanetary Disks, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 1, 01A307-331
- *Muranushi, T., Okuzumi, S. & Inutsuka, S., 2012, Interdependence of Electric Discharge and the Magnetorotational Instability in Protoplanetary Disks, *Astrophys. J.*, 760, 56(14pp)
- *Takamoto, M., Inoue, T. & Inutsuka, S., 2012, Enhanced Dissipation Rate of Magnetic Field in Striped Pulsar Winds by the Effect of Turbulence, *The Astrophysical Journal*, 755, 76(6pp)
- *Muto, T., ..., Inutsuka, S., et al, 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, *The Astrophysical Journal*, 748, L22(7pp)
- *Ikoma, M. & Hori, Y., 2012, In Situ Accretion of Hydrogen-rich Atmospheres on Short-period Super-Earths: Implications for the Kepler-11 Planets., *Astrophys. J.*, 753, 66(6pp)
- Oka, A., *Inoue, A. K., Nakamoto, T., and Honda, M., 2012, Effect of Photodesorption on Snow Line at the

Surface of Optically Thick Circumstellar Disks around Herbig Ae/Be Stars, *Astrophysical Journal*, 747, 138(12pp)

*Kokubo, E., Ida, S., 2012, Dynamics and Accretion of Planetesimals. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 01A, 308 (23pp)

*Sato, B. ... Kokubo, E., Ida, S., 2012, Substellar Companions to Seven Evolved Intermediate-Mass Stars, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 64, 1-14

2011年7月-12月

*Nagasawa, M. & Ida, S., 2011, Orbital Distributions of Close-in Planets and Distant Planets Formed by Scattering and Dynamical Tides, *Astrophys. J.*, 742, 72 (16pp)

*Kunitomo, M., Ikoma, M., Sato, B., Katsuta, Y. & Ida, S., 2011, Planet Engulfment by ~1.5-3 M_{sun} Red Giants. *Astrophys. J.*, 737, 66(8pp)

*Muto, T., Takeuchi, T. & Ida, S., 2011, On the Interaction between a Protoplanetary Disk and a Planet in an Eccentric Orbit: Application of Dynamical Friction, *Astrophys. J.*, 737, 37 (23pp)

*Fujii, Y., Okuzumi, S. & Inutsuka, S., 2011, A Fast and Accurate Calculation Scheme for Ionization Degrees in Protoplanetary and Circumplanetary Disks with Charged Dust Grains, *Astrophys. J.*, 743, 53 (9pp)

*Hori, Y. & Ikoma, M., 2011, Gas giant formation with small cores triggered by envelope pollution by icy planetesimals, *MNRAS.*, 416, 1419-1429.

*Oka, A., Nakamoto, T. & Ida, S., 2011, Evolution of Snow Line in Optically Thick Protoplanetary Disks: Effects of Water Ice Opacity and Dust Grain Size, *Astrophys. J.*, 738, 141 (11pp)

【主な論文一覧：公募研究】（全て査読有、特に顕著な研究成果に基づく論文発表のみ抜粋）

2013年1月-現在

*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", *The Astrophysical Journal*, 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, *the Astrophysical Journal*, 764, 120 (11pp)

2012年4月-12月

*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

*Inubushi, M., Kobayashi, M. U., Takehiro, S., Yamada, M., 2012, Covariant Lyapunov analysis of chaotic Kolmogorov flows, *Phys. Rev. E.*, 85, 016331-1--10.

*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--165, DOI: 10.1017/jfm.2012.356

*Kimura, Y., Tanaka, K.K., Miura, H., and Tsukamoto, K., 2012, Direct observation of the homogeneous nucleation of manganese in the vapor phase and determination of surface free energy and sticking coefficient, *Crystal Growth & Design*, 12, 3278--3284

*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, *The Astrophysical Journal*, 747, 47(16pp)

*Muranushi, T., Okuzumi, S., Inutsuka, S., 2012, Interdependence of Electric Discharge and Magnetorotational Instability in Protoplanetary Disks, *The Astrophysical Journal*, 760, 56(14pp)

【一般向けアウトリーチ】

小久保英一郎

- WEB シーズン・インタビュー, 光村チャンネル, 2012 年
系外惑星の発見とシミュレーション天文学, WEBRONZA+, 2011 年
- 雑誌 宇宙をめぐる物語, 週刊朝日, 2012 年 8 月 17-24 日号, 118.
学者男子, an・an, 2012 年 4 月 4 日号, 27.
夢のかなえかたを大人に聞いてみました, DreamNavi, 2012 年 5 月号, 6
- テレビ番組出演: 『NHK 高校講座地学基礎』 NHK 教育, 2013.5.15 OA
『エル・ムンド』 NHKBS1, 2013.2.18 OA
『コズミックフロント』 NHK BS プレミアム, 2013.2.14 OA
『Futurescape』 Fm yokohama 84.7, 2012.6.2 OA
『コズミックフロント』 NHK BS プレミアム, 2012.1.31 OA
『コズミックフロント』 NHK BS プレミアム, 2011.9.20 OA

井田茂

- 書籍 『系外惑星 - 宇宙と生命のナゾを解く』 ちくまプリマー新書
- 対談 『人類滅亡を避ける道—関野吉晴対論集』 東海教育研究所
- プラネタリウム監修 『GOODNIGHT GOLDDILOCKS』 ~太陽系外惑星の世界(五藤光学研究所)
-

倉本 圭

- 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: とともに月一回開講, 2011~継続中
- 高校教員対象セミナー講師: 『第二の地球は存在するか』, 北海道高教研物理部会, 札幌市, 2012 年 1 月 12 日: 『同』 惑星科学研究センター第一回惑星科学最前線セミナー, 神戸市, 2012 年 3 月 15 日: 『同』 物理教育学会札幌支部, 札幌市, 2012 年 6 月 9 日: 『系外惑星におけるハビタビリティ』 惑星科学研究センター第二回惑星科学最前線セミナー, 神戸市, 2012 年 12 月 22 日
- テレビ番組出演: 『頭がしびれるテレビ』 NHK, 2012.6.3 OA

阿部 豊

- テレビ番組出演: 『コズミックフロント』 NHK BS, 2013.4.4 OA

はしもとじょーじ

- 地球科学分野若手会講座講師: 『多様な惑星の気象学と気候学』, 第 23 回日本気象学会夏期特別セミナー(若手会夏の学校), 愛知県民の森(愛知県新城市), 2011 年 9 月 5 日
- 小学生対象授業講師: 『空気であそぶ』, おもしろ理科実験教室, むかわ町役場穂別総合支所(北海道勇払郡むかわ町), 2013 年 1 月 8 日

【新学術領域研究ウェブサイト】

<http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.u-tokyo.ac.jp/index.php>

に新学術領域研究ウェブページを製作し、同時に英文ページの製作も行った。最新の成果の紹介や研究会案内、公募研究案内等を、当ホームページを通じてリアルタイムに広く周知できるよう、更新作業を行いながら、努めている。

9. 今後の研究領域の推進方策（2ページ程度）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募班での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

各研究項目は、以下の個別に記載する方策に従って研究を推進する。領域研究の推進のためには、いずれの研究項目の方策に記述がある通り、研究項目間の密接な情報交換が行われる事が前提となっている。総括班では研究の遂行上、円滑に研究項目間の連携が達成されるよう、定期的に開催する総括班会議、研究推進会議や、系外惑星大研究会等（国内研究会および国際研究会）を通じて、研究者の交流や成果の相互理解に有効な機会の提供を行う。また、平成24年度、平成25年度の2年間の課題として公募した第一回公募研究、および平成26年度平成27年度の2年間の課題として公募する予定の第二回公募研究では、新学術領域研究の終了後の系外惑星研究の姿を見据えて、研究項目 A01, A02, B01, B02 だけではカバーしきれない、10年スケールでの発展を見込んだ萌芽的な研究課題も積極的に取り入れる。これによって、本研究領域の研究推進の持続性と充実を図る。

【研究項目 A 0 1】

研究項目 A01 では、何よりもまず高コントラスト赤外線面分光器 (CHARIS) を完成させることが最優先である。CHARIS は現在最終設計が進んでいるが、同時に近赤外線検出器など主要部品の調達を行なっている。平成25年10月に最終設計審査を行って、実機の組立に移行する予定である。組立には半年ほどを要し、その後半年かけてプリンストン大学で試験と最終調整を行った後、平成26年度中にハワイ観測所に輸送、平成27年度前期に超高次波面補償光学装置 (SCExAO) との組合せ試験を行って、年度後半から観測に入る計画である。ハワイで開発している SCExAO は、すばる望遠鏡実機での試験を進めて CHARIS の導入を待ち受ける。問題点としては、1ドル=100円を越して円安が進むと CHARIS の製作経費が不足する恐れが出てくる。この問題への対処は極めて難しいが、実際に経費不足が明らかになった場合にはプリンストン大学と協議をして、同大学の負担を増額してもらうよう交渉を行う予定である。

SEEDS プロジェクトによる系外惑星の直接撮像については、これまでに検出されている数個の惑星候補天体が本当に主星に付随しているかどうかを確認し、惑星か否かを確定する。惑星であることが確認されたものについては、平成27年度後半に観測を開始する CHARIS を用いた最初の観測ターゲットとして、スペクトルの取得を試みる。

地球型惑星の間接検出に関しては、重力マイクロレンズ法による観測が具体的な成果を挙げ始めており、新たに PD 研究員1名を雇用することで成果を上げる体制を強化する。問題点として、ドップラー法で地球型惑星検出を試み高精度赤外線ドップラー分光器については、その開発・製作は本計画研究とは独立して実施されているので、本計画研究の進捗と歩調を合わせるのは簡単ではないが、今後ハワイ観測所の職員で研究分担者である高遠が、分光器の開発・製作チームとより密接な連絡をとって完成を支援することとする。

【研究項目 A 0 2】

研究項目 A02 では、(1) 大気循環と熱収支の解明と予測 (2) 系外惑星の大気進化の多様性の解明 (3) 系外惑星大気のキャラクタリゼーションと解釈の3項目の研究をそれぞれ拡充する。特に(3)については、大気放射スペクトルモデルの数値的堅牢性の確認を行いつつ、現実の太陽系惑星大気の観測比較による大気放射モデルの検証を順次進める。そして系外惑星に想定される多様な大気組成と境界条件を与えて、循環シミュレーション研究との協働により熱的平衡状態にある大気構造を求め、研究項目 A01 が得るスペクトルとの比較を通じ系外惑星の特徴推定を進める。これまでの研究で、系外惑星の(将来)観測データとの対比のみならず、大気進化モデルの構築においても、対流圏界面付近およびより上層の大気構造を解明することが重要であることが分かってきた。これは、観測可能量の多くがこの領域の大気構造(気温・組成・運動)を強く反映することはもちろんであるが、軽分子の宇宙空間への散逸過程に、この領域の物理過程(対流圏上部による凝結、成層圏へ

の水蒸気輸送、光分解、分子拡散など)が中心的な役割を果たすためである。しかし、たとえばハビタブル惑星の一つの候補とされ、研究項目 A01 での検出目標ともなっているハビタブルゾーン内の同期回転惑星において、成層圏への水蒸気輸送の機構や、そのような惑星上での液体の水の長期的安定性は全く解明されていない。これまで班内で進めてきた大気循環、大気放射、散逸過程、光化学過程のモデリング研究からはこの問題に対するヒントが得られつつある。これらを統合し大気上部における諸過程と大気構造の解明を主眼とするモデリング研究を進め、他のタイプの惑星大気や観測データとの比較検討、惑星内部との相互作用の組み込みを行い、系外惑星大気構造と進化過程を解明する。

【研究項目 B01】

研究項目 B01 内では、観測・理論・実験の連携を一層強化する。特に、巨大惑星形成に伴うギャップやインナーホール形成、ギャップ構造の諸量(幅、深さ)から円盤物理量(厚み、粘性等)の推定、ダスト粒子のサイズ成長、ダスト結晶化機構、円盤と惑星との相互作用、円盤内の水の振る舞いの理解といった研究テーマで、手法間の密な連携が必要不可欠である。すなわち、研究項目 B02, A01 との連携が必須であり、これまでどおり、研究項目をまたいだ連携体制をとる方策をとる。

まず、観測的手法に関わる研究の方策として、すばる望遠鏡によって得られた結果も踏まえ、ALMA 観測を推進する。これまでは、興味深い内部構造を示すことが既知の円盤を個別に取り上げてきた。今後は、共通した特徴を示すグループを一括して扱う戦略的計画を拡大していく。また、巨大惑星によるギャップ形成やガス降着停止によるインナーホール形成についての研究も、理論と共同で進める。赤外線領域では、新たに開発したカメラを用いた原始惑星系円盤の時間変動観測に取り組む。あかり全天サーベイにより検出された残骸円盤に関しても、時間変動の有無の調査を含めて、追観測を進める予定である。

次に、固体物質の組成進化に関わる理論と実験研究の方策として、特に、円盤・惑星とダストとの相互作用をさらに精緻に取り入れたダスト成長進化の理論研究を拡大する。この方向性ではすでに、氷微惑星の衝撃波加熱による蒸発とそれに伴うミクロンサイズ氷微粒子の供給に関する初期成果を得ている。今後はさらに、シリケート・氷の両成分に適用可能な包括的ダスト成長理論の確立を目指す。実際、これらを担う研究分担者、PD 研究員を平成 25 年度から強化した。理論と並行して、これまで整備した低温室・2 段式軽ガス加速装置を用いた衝突実験を推進する。氷物質を対象にした実験結果を利用し、現在標準となっているダスト付着モデルの再検証も行なう。以上の結果を、微惑星衝突破壊・蒸発による微粒子生成モデルの構築や、原始惑星系円盤・デブリ円盤観測の解釈にも応用する。天文、惑星科学分野に加え、地球惑星物質科学分野の研究者との共同研究も推進する。

また、原始星期のガス化学組成のモデル計算は、円盤内の揮発性物質についての精密な初期条件を与えるだけでなく、円盤形成期の ALMA 観測とも密接に関係する。それゆえ、ガス化学計算に関する研究における方策として、今後は観測結果との比較を密に行うとともに、原始星期から前主系列期までの一貫したモデルの構築を目指す。一方、円盤内での水の重水素比の進化についての研究は、「液体の海を持つ惑星」としての地球型惑星の形成進化の解明に寄与する。モデルには有機物など他の分子も含まれており、これら分子や他の元素同位体比にも研究を広げる。また、円盤内の水の振る舞いに関連し、赤外線観測を通じた水の雪線の検出可能性についても検討を進める。

最後に、観測結果と直接比較可能な円盤の輻射モデル計算は、そこでの惑星形成過程・円盤物質の性質に関する議論を展開する上で不可欠な手法である。しかし、現状では「素過程の理解を深める理論研究」と「データが示す直接情報に立脚した観測研究」の狭間にあり、体制の更なる強化が必要である。公募研究では、特にこの観点からの参画を強く呼びかける。

【研究項目B02】

研究項目 B02 では、系外惑星観測を扱う研究項目 A01、円盤観測を扱う研究項目 B01、惑星大気モデリングを行う研究項目 A02 を有機的に結びつけるとともに、それらとの連携をもとに、太陽系のみならず系外惑星系の形成を統一的に記述できる形に惑星形成理論を一般化することを狙う。そのため、惑星形成の各過程に対する大規模数値シミュレーションを推進し、その結果をもとに、観測データと詳細比較可能な包括的惑星形成モデルを構築し、巨大ガス惑星やスーパーアースの分布の統計的性質を理論的に説明するとともに、今後の重要な観測対象であるハビタブル惑星（生命居住可能惑星）の質量・軌道分布の高精度理論予測を目指す。

今後この方法論で進めていくが、系外惑星研究は急速に発展しており、特に観測に関しては、次々と新しいデータが出てくる。このような状況を鑑みて、研究項目 B02 では、新しい観測データの出現に応じて、研究計画を付け加えたり、作業の順番を変えたりといった柔軟な対応をとりたいと考えている。また、研究項目 B01 が関わる大型電波干渉計 ALMA が稼働を始め、試験観測においても、原始惑星系円盤に関する驚くべきデータがとられている。研究項目 B02 では、常に観測可能性を意識した理論モデル作りをし、観測との比較検討を絶えず行って、理論モデルのキャリブレーションを行っていききたい。

一方で、目先の観測データにあまり振り回されないようにするという方針も重要であり、それを堅持して、大規模な流体シミュレーション、輻射シミュレーション、N体シミュレーションを遂行して行きたい。系外惑星の理論分野では、特に欧米において、大規模な数値シミュレーションを行わないで短い論文を書くという傾向が強まっている。われわれは、それに対して、なるべく第一原理的な数値シミュレーションを実行して、基礎プロセスを理解することを指向してきた。数年レベルの時間スケールでもあっても、その方法論のほうが有効であることは、研究項目 B02 の国際ジャーナルへの論文発表数がすでに 50 編を越えているという事実により、すでに証明されたと、われわれは考える。日本ではスーパーコンピュータ「京」が基礎科学研究にも開放されており、今後はより一層、大規模数値シミュレーションに力を入れる予定である。

10. 組織変更等の大幅な計画変更がある場合は当該計画（研究代表者の変更は真にやむを得ない場合に限る）（2～5ページ程度）【非公開】※本欄に記載の計画研究については、全て3年度目の審査の対象となります。

領域内の計画研究の研究代表者の交替や組織体制に大幅な変更がある場合（新しく計画研究を追加する場合や既存の計画研究を廃止する場合、領域全体の交付予定額の範囲内で各計画研究の研究経費を変更する場合（計画研究に係る経費を減額し、公募研究に係る経費を増額する場合等））には必ず記入してください。その際、以下の点を含めてください。

- ・計画研究を追加する場合は、追加の必要性、その計画研究が領域内で果たす役割、他の計画研究への影響等
- ・計画研究を廃止する場合は、廃止の理由、当該計画研究を廃止しても領域として支障がないことの説明等
- ・研究代表者の交替の場合は、交替の必要性、新旧の研究組織の異なる点（組織構成、領域内で果たす役割等）、新たに研究代表者になるようとする者が、旧研究代表者に替わって研究を実施できることの根拠、妥当性及びその者の研究業績等
- ・計画研究に係る経費と公募研究に係る経費の額の変更については、その必要性、1回目の公募研究の応募・採択状況等（公募研究に係る経費を減額して計画研究に係る経費を増額する変更は真にやむを得ない場合に限る。また、公募研究の規模に係る最低基準を下回らないこと。）
- ・以上の各変更に伴う他の計画研究の研究経費の変更及びその妥当性等

該当せず