

## 平成25年度 新学術領域研究（研究領域提案型） 中間評価結果（所見）

### 研究領域名

太陽系外惑星の新機軸：地球型惑星へ

### 研究期間

平成23年度～平成27年度

### 領域代表者

林 正彦（国立天文台・台長）

### 研究領域の概要

1995年の太陽以外の恒星を周回する惑星（系外惑星）の発見以来、系外惑星は人類に新しい宇宙観をもたらしている。太陽系内の8個の惑星に対し、すでに500個近い多様な系外惑星が発見されている今、従来の枠を超えた新機軸により、系外惑星科学を展開することが求められている。本領域研究では、過去7年間で開花した我が国における系外惑星科学をさらに飛躍的に発展させるため、天文学と惑星科学の研究者の強い連携・融合のもと、ハビタブルゾーンに地球型および木星型の系外惑星を検出、木星型惑星を直接分光してキャラクタリゼーションを行い、また惑星誕生の場である原始惑星系円盤の高解像度観測を推進し、これらを惑星形成および惑星大気の理論研究と融合することで、太陽系内外の地球型および木星型惑星の起源、形成、進化を統一的に解明することを目標とする。

### 領域代表者からの報告

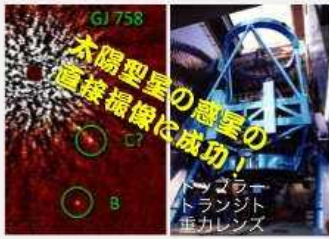
#### 1. 研究領域の目的及び意義

##### 『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』

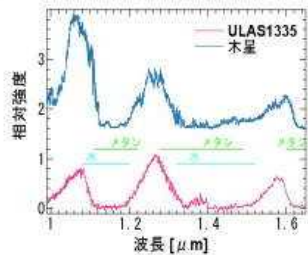
本領域では、天文学と惑星科学の密接な連携・融合によって、我が国において「系外惑星」という新たな学術領域を確立して世界的リードを狙うことで、当該分野における我が国の学術水準を飛躍的に向上・強化することを目的とする。その中心となるのは、直接的・間接的観測手法を用いた太陽系外惑星の検出である。これによって、木星型から地球型にいたる多様な惑星の性質や、その形成と進化の統一的理解を目指す。木星型ガス惑星については、独自開発したすばる望遠鏡用の観測装置を用いて多数の惑星を直接検出し、軌道半径1AU程度の生命存在可能領域（ハビタブルゾーン）から太陽系のサイズに至る範囲でガス惑星を直接検出することを目指す。ま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

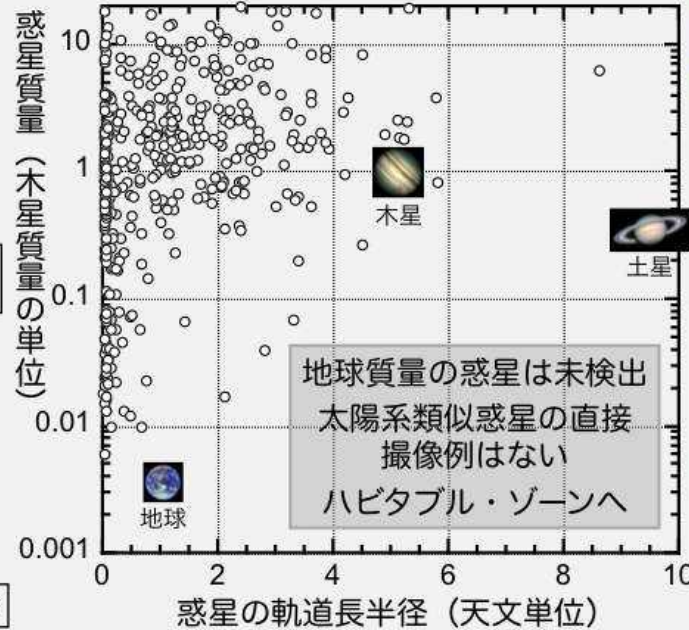
### A: 木星型からハビタブル地球型まで



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

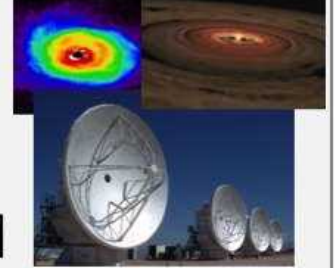


惑星大気モデリングと大気進化

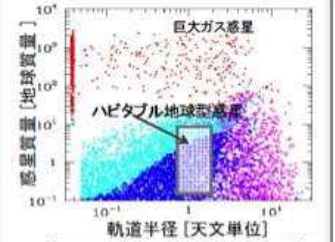


地球質量の惑星は未検出  
太陽系類似惑星の直接撮像例はない  
ハビタブル・ゾーンへ

### 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<sup>+</sup>）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（6 AUまで調べるには約15年かかる；1 AUは地球-太陽間の距離）、また太陽型ではあるが若い恒星（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 (> 4 AU) 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(キャラクター化)。
- 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. 研究の進展状況及び成果の概要

### 【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、現時点ではほぼ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(キャラクター化)。

【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、系外惑星大気の精緻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リゼーションと解釈、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発展させ、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实现が可能となり。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対流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、これら惑星大気の大気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】** 原始星期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。

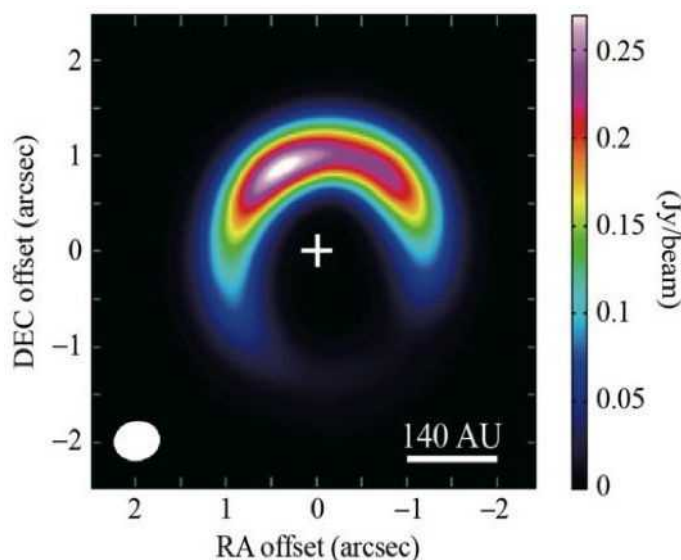


図3-1: ALMAによって取得された若い星HD142527に付随する原始惑星系円盤のサブミリ波・ダスト連続波イメージ。十字は星の位置を、左下の白い楕円は点源を観測したときに得られる広がりを、それぞれ示す。

## I. 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、永年的な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。その後観測が急進展し、この軌道の多様性とともなるバルク密度（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とも密接にからむ。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。

## 審査部会における所見

A (研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの進展が認められる)

### 1. 総合所見

本研究領域は、天文学と惑星科学のいわば中間に位置する研究対象について、この両分野の連携を図り、宇宙に存在するであろう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大幅に深めることを目指している。明確な目的と研究計画のもと、オールジャパン体制での人的資源の投入と新しい分光装置の導入により新たな学術領域研究を推進するというコンセプトは適切である。モデル系による数値計算は、大気循環、円盤の構造や組成の解明、惑星の形成過程などで、興味深い成果を上げている。特に、従来説明が困難であった観測結果を説明するシミュレーションなど、新しい手法により世界をリードする成果が得られている点は評価できる。一方、これらが観測に結びつくフェーズにはまだ至っていないことから、領域全体としては設定目的に照らして期待どおりに進展していると判断し、研究期間後半の活動に期待したい。

### 2. 評価に当たっての着目点ごとの所見

#### (a) 研究の進展状況

「異なる学問分野の研究者が連携して行う共同研究等の推進により、当該研究領域の発展を目指す」という研究領域の設定目的に照らして、着実に研究が進展している。また、「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究等の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指す」という趣旨が実現されている。すなわち、すばる望遠鏡に取り付ける新型惑星分光装置の開発、ALMAの徹底活用、これらから得られる観測データを取り込んだ理論・数値シミュレーションの連携など、様々な最新の手法が有機的に取り入れられている。極めて具体的かつ着実に新たな視点と手法により、注目すべき成果が得られている点は評価できる。今後の研究推進上、大きな問題となる点は見当たらない。

#### (b) 研究成果

本研究領域では、天文学と惑星科学の連携という異分野連携の他、理論・数値シミュレーションと観測、太陽系惑星と系外惑星の研究の連携といった異分野の連携が重層的・多角的に図られている。これにより、ガス惑星の直接検出、類似の幾つかの候補天体の検出、原始惑星の検出などの観測と、円盤構造や円盤内固体物質の組成等の理論・計算的解明が相互にアイデアを出し合い、現時点で期待された成果を上げている。「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究等の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの」としては、すばる望遠鏡に設置する新型分光装置の開発が順調に進展していること、すばる既存装置により惑星と原始惑星円盤研究が急進展していること、ALMAによる観測に戦略的に取り組んでいることなど、現時点で期待された成果を上げていると評価できる。さらに、これらの観測的成果を解釈し体系づけるための新しい計算手法の開発、すなわち系外惑星の多様性を説明するための理論・シミュレーション研究、太陽系惑星と系外惑星の大気循環シミュレーション、水の滞留などについてすでに成果が出始めており、その成果は積極的に公表されている。

#### (c) 研究組織

研究組織は、研究項目 X00 が総括班会議、研究推進会議により4つの研究項目のステアリングを行う体制となっている。各計画研究がよく機能しており、今後さらに有機的に連携することを期待する。また、連携のためのチーム内研究会、国際会議なども活発に行われている。研究成果の公開のための日本語及び英語によるウェブページも充実しており、研究成果の積極的な公表・普及に努めていると認められる。ま

た、数は多くはないが、若手研究者の育成にも注力している。

**(d) 研究費の使用**

円安・円高の影響についてはフレキシブルに対応するように考慮されている。しかし、特別推進研究により行われている赤外線観測に関する研究との関係が分かりにくいいため、研究費の切り分けについては留意が必要である。

**(e) 今後の研究領域の推進方策**

モデル系による数値計算はすでに興味深い成果を上げており、大気循環や惑星形成過程について理論内での相互理解が深まるとともに、電波干渉法による円盤内ダスト探索について理論的な方法論の提案がなされている。一方、本研究領域の装置として最も期待されている赤外線面分光器や波面補償光学装置などは、それらの開発が計画通りに進捗しているようではあるが、まだ稼働していないためそのインパクトを十分に感じることはできない。そのため、望遠鏡に装置が取り付けられて、実際に観測が開始された後に真の成果が分かるということではなく、途中経過におけるマイルストーンとして判断基準・項目を明示し検証してはどうか、との意見もあった。研究期間後半では、理論計算と観測とが結びつき、ALMA を使った実観測を含め、さらに活発な研究活動が行われることを期待したい。

**(f) 各計画研究の継続に係る審査の必要性・経費の適切性**

各計画研究は順調に進展しており、継続に係る審査の必要はない。また、研究経費の必要性・妥当性についても問題はない。