

**平成30年度 研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型)  
中間評価資料(進捗状況報告書)**

## 1. 概要

<b>研究交流課題名 (和文)</b>	惑星科学国際研究ネットワークの構築		
<b>日本側拠点機関名</b>	東京大学		
<b>コーディネーター 所属部局・職名・氏名</b>	大学院理学系研究科・教授・杉田精司		
<b>相手国側</b>	<b>国名</b>	<b>拠点機関名</b>	<b>コーディネーター所属部局・職名・氏名</b>
	アメリカ	アリゾナ大学	Lunar and Planetary Laboratory ・ Professor ・ Dante LAURETTA
	スイス	プラネットエス (ベルン大学)	Physics Institute ・ Professor ・ Willy BENZ
	フランス	コートダジュール 天文台	Lagrange Laboratory ・ Senior Researcher ・ Patrick MICHEL
	ドイツ	ドイツ航空宇宙 センター	Institute of Planetary Research ・ Professor ・ Ralf JAUMANN

## 2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

## ○申請時の研究交流目標

これまで、理論を主とする惑星形成論と観測を主とする系内惑星探査は異なる分野として独自の発展を遂げてきた。しかし、1995年に太陽系外に惑星が発見され、さらに太陽系内の相次ぐサンプルリターン探査の成功を受けて、この状況は急速に変化している。これらは、我々の宇宙観の根底に関わる歴史的な大成果であるのみならず、宇宙史という文脈における太陽系の起源とその普遍性、地球の水に代表される物質の起源と循環、さらには生物の誕生と起源という、人類にとっての究極の問いに答え得る歴史的な瞬間が到来していることを意味する。それらに答えるには、旧来の研究分野の壁を取り払い、理論、観測、シミュレーションを総動員して系外と系内を統一的に解き明かす新たな惑星科学を立ち上げることが不可欠である。これは世界的にも未だ例を見ないものの、太陽系形成の京都モデル、すばる望遠鏡による系外惑星直接撮像、はやぶさ探査、などで実証済みの日本の豊富な実績と優れた人材を最大限に活用し、さらに東京大学理学部の天文学、地球惑星科学、物理学の研究者が結集することで、惑星科学の新たな国際的研究拠点形成を目指す。

本計画では、(A)小天体のリモセン観測、(B)回収サンプルの微量分析、(C)衛星搭載望遠鏡による系外惑星の観測、(D)系外惑星の地上望遠鏡観測、(E)惑星形成理論の構築の5アプローチから、現代惑星形成論の3大問題（(1)微惑星形成問題、(2)氷・有機物の凝縮位置の問題、(3)惑星移動問題）に迫る。さらに、各アプローチの観測現場に若手研究者の比較的長期の派遣と受入を行うことによって、分野横断の議論で得られた知見を具体的な研究成果に繋げられる密接な国際連携関係を構築する。

## ○目標に対する達成度とその理由

上記目標に対する2カ年分の計画について、

- 十分に達成された
- 概ね達成された
- ある程度達成された
- ほとんど達成されなかった

【理由】

本課題の最初の2年間での達成目標は、太陽系内と系外の惑星科学の垣根を取り払って分野横断で議論が行われる体制を築くこと、3年目に科学観測が本格化する太陽系小惑星探査機（はやぶさ2（日本）、MASCOT（欧州）、OSIRIS-REx（米国））のデータを共同解析する体制を構築すること、将来の惑星探査・観測衛星プログラムを牽引する若手リーダーを育成できる国際交流体制を構築することであった。

この目的意識の下で、我々は課題採択直後の夏にサマースクールを開催して、太陽系内と系外の惑星科学における数多くの第一人者を講師として呼び、分野横断でのセッションを行った。系外・系内を横断した惑星科学の議論は、諸外国にもほとんど見られない。この理由は、太陽系内惑星科学が3時限的な詳細観察を重んじる地球科学者の活躍の場であるのに対して、系外惑星科学が点光源を望遠鏡観測で計測する天文学者の活躍の場であるという研究手法に根ざした分野の断絶が世界規模で存在しているからである。しかし、研究対象は同じ惑星である。議論の端緒さえ掴めれば互いの相補性に気付かされ、多くの共同研究の可能性があることが認識されて大変な盛況となった。このサマースクールの成功により、その後の国際協力は大きく進展することとなった。

本課題では、太陽系内惑星探査の R-1、系外惑星観測および理論の R-2、系外・系内を跨ぐ惑星形成・進化理論の R-3を配置して、太陽系内から系外をシームレスに繋ぐ布陣で国際研究交流活動を進める計画であるが、どの共同研究も順調に進展しており、論文業績も順調に伸びている。2年間で57編の査読付き論文が出版された（うち14編が相手国との共同論文）。ここには本課題の国際セミナーとして開催された はやぶさ2拡大サイエンス会議および OSIRIS-REx・はやぶさ2連携サイエンス会議での議論をベースに Space Science Review 誌に特集号が生まれ、23本の査読付き論文が出版されたことが大きく貢献している。これは、はやぶさ2探査機と MASCOT 着陸機に搭載された観測機器群のスペックから科学観測計画の詳細に至るまでの網羅的な文献集であり、はやぶさ2を中心とする日欧米の探査機データの共同解析するための基盤となるものである。本課題のセミナーで国内外の研究者間の議論が促進され、はやぶさ2の小惑星リュウグウ到着前に論文出版を間に合わせられたことは大きな成果であった。また、惑星形成理論の観点にも大きな進展があった。端的に言えば、水惑星やハビタブル惑星の形成の鍵を握るのは、それらが現在位置する場所（中心星に近い場所）ではなく、それより遠いスノーライン（揮発性成分の凝縮限界線）付近の物理化学過程であることが分かったことである。これは、今後の観測的研究のフォーカスを大きく変えるインパクトを持っている。

各国拠点との人的交流は、国際セミナーを中心に順調に進んでいる。2年間の海外拠点との交流実績は、日本側拠点から海外拠点へ63名・939人日、交流相手国から日本側拠点へ23名・128人日（相手国側参加研究者リスト外の研究者も含めると52名・273人日）であった。

若手研究者育成については、上記サマースクールの講義の合間に、大学院生や若手のポストドクにポスター発表の場を設け、外国人講師と日本人若手のマッチメイキングの場を提供した。そこで海外修行の交渉が成立した場合は、第二年度以降の長期派遣提案に繋げてもらった。平成28、29年度で合計18件の若手海外派遣が実現した。彼らの多くは日本側の探査機ないし観測装置のデータを携えて相手国を訪問し、相手国の探査機のデータとの共同解析の基盤を作ることに貢献してくれた。平成30年度に本格化する はやぶさ2・MASCOT 探査、OSIRIS-REx 探査、TESS 衛星観測の国際的な共同解析を彼ら若手研究者が主

導する形で実施できる体制を築けたことは大きな成果である。

### 3. これまでの研究交流活動の進捗状況

(1)これまで(平成30年3月末まで)の研究交流活動について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。※各年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

#### ○共同研究

太陽系内惑星探査の R-1、系外惑星観測および理論の R-2、系外・系内を跨ぐ惑星形成・進化理論の R-3を配置し、太陽系内から系外をシームレスに繋ぐ布陣で国際研究交流活動を進めた。それぞれに共同研究ごとの概要は以下の通りである。

【R-1】国際連携小惑星探査による初期太陽系内における揮発性物質の進化過程の調査(代表:杉田精司)

【概要】日米欧の小天体探査に掛かる国際研究協力体制の構築については、日欧米の3探査機の間で連携した科学観測運用の準備および取得探査データの連携解析の準備において大きな成果があった。

まず、連携観測運用の準備については、小惑星形状モデルのチーム間での国際連携の活動が際立った。球形に近い大きな普通の惑星と異なり、小天体は不定形状が通常である。これは、小惑星探査機を誘導する宇宙工学者の頭を常に悩ませる問題であり、米国でも欧州でも近年の小天体探査の進展と共に、不定形状をいかに迅速かつ正確に数値化して、探査機誘導に反映させるかが重要な課題である。これは各国の宇宙技術者の腕の見せ所ではあるが、純粋に科学探査のためだけに発展してきた技術であるため、機密扱いにならず各国の研究者が情報を自由に交換して相互参照している。今回のはやぶさ2、MASCOT、OSIRIS-RExの場合には、単なる情報交換から一歩進んで、形状モデルチームがお互いに相手チームが大変な時期に応援に駆けつける体制を構築できた。このような基幹技術に掛かる研究者の相互乗り入れは、日本が世界の太陽系探査の中で中核的な役割を果たし続ける上で大きな意義ある。

次に、取得探査データの連携解析の準備については、若手研究者の交流を通じた軌道上データと着陸機データの間の連携解析の枠組みができたことが大きな成果である。日本の若手は、母船はやぶさ2のリモセンデータを持って欧州の宇宙機関に飛び、欧州の子機であるMASCOTのデータ解析に参画する。逆に欧州の若手はMASCOTのデータを持って日本に飛び、はやぶさ2のデータ解析に参画する。同様に日米の間では、はやぶさ2とOSIRIS-RExの両プロジェクト間で若手を通じたデータと人の交換を進めた。この交換により、母機データと子機データを有機的に結びつけて解析する科学者間の連携関係やアカデミックな情報交換関係が推進され、多くのグループにおいて共同論文の執筆の段階まで至っている。この関係は、単に現在進行形の探査機からの科学成果創出に役立つだけではない。日本の若手研究者が欧米の次世代リーダー候補たちと共に国際連携活動の中核を担う体制ができており、彼らが国際的なリーダーとして育っていく機会を与えられる体制が築かれた。

【R-2】系外惑星系の多様性の探究に関する共同研究(代表:須藤靖)

【概要】主にフランスコートダジュール天文台および米国プリンストン大との間で惑星リング及び衛星モデルに関する多方面の研究が順調に進捗している。例えば、岡部の滞在中にコートダジュール天文台の共同研究者との共著論文の計算が終わり、新たな論文を完成させた。逢澤は、系外惑星リング探査に関する自分の研究に関してプリンストン大学の研究者から有益なコメントを得て、論文の完成・投稿に至っている。須藤の滞在中には、Josh Winn教授と系外惑星系の主星自転・惑星公転角に関する新たな観測的、理論的共同研究を開始した。特に星震学を用いた自転傾斜角推定法の統計に関して議論を本格化することが

できた。さらに、須藤がコートダジュール天文台に滞在中に行ったセミナーと議論を通じて、惑星リング及び衛星モデルに関して有益な情報が得られた。平成30年3月末には、コートダジュール天文台の研究者が来日する機会があり、その際にはビッグバン国際研究センターに滞在し、セミナーと議論が実現した。このように、今回の研究活動が、さらなる共同研究へ発展しつつある。

【R-3】初期惑星系における物質の起源と循環：太陽系科学および系外惑星科学の相乗効果（代表：生駒大洋）。  
 【概要】平成28年度に物質科学的効果を考慮した新たな惑星形成モデルの構築に着手し、そのモデル検証のために木星内部の重元素分布に関する理論予測と観測データの比較を行った。この活動は、コートダジュール天文台およびチューリッヒ大学のグループとの研究交流として実施した。その結果、JUNO データが我々の惑星形成モデルと定性的に整合的であることを明らかにするという成果を得ることができた。また、定量的な整合性をみるには、固体集積過程の詳細化が必要であることがわかり、問題点および今後の研究方針が整理された。さらに、ケプラーデータの詳細な統計解析により、短周期惑星の大気量は惑星質量に関して二峰分布をしており、これが惑星移動過程に重要な制約を与えることがわかった。平成30年度に打ち上げ予定の系外惑星サーベイ衛星 TESS によって検出される惑星を詳細に特徴付けることによって、その起源に迫ることができる。我々がこれまで取り組んで来た系外惑星大気の特徴づけと、TESS との連携に関する方針も整理された。これらの国際交流研究の結果、R-3 日本側代表者である生駒大洋が、欧州の系外惑星専用近赤外観測衛星計画 ARIEL の海外招聘メンバーとして加わるよう要請を受けたことも、国際拠点形成に向けた大きな収穫である。

#### ○セミナー

	平成28年度	平成29年度
国内開催	2回	2回
海外開催	2回	1回
合計	4回	3回

【概要】本課題が採択されてすぐの初年度夏に、飛騨高山にてサマースクールを開催して、太陽系内と系外の惑星科学における数多くの第一人者を講師として呼び、分野横断でのセッションを行った。系外・系内を横断した惑星科学の議論は、諸外国にもほとんど見られない。この理由は、太陽系内惑星科学が詳細を重んじる地球科学者の活躍の場であるのに対して、系外惑星科学が点光源を望遠鏡観測で計測する天文学者の活躍の場であるという研究手法に根ざした分野断絶が世界的に蔓延していることにある。しかし、研究対象は同じ惑星である。議論の端緒さえ掴めれば互いの相補性に気付かされ、多くの共同研究の可能性があることが認識され、このサマースクールは大変な盛況となった。この講義の合間には、大学院生や若手のポストドクにポスター発表の場を設け、外国人講師と日本人若手のマッチメイキングの場を提供した。そこで海外修行の交渉が成立した場合には、第二年度以降の長期派遣提案に繋げてもらった。

その後は、日欧米の系内惑星探査の連携活動強化のために国内でははやぶさ2サイエンス会議を開催し、米国で OSIRIS-REx はやぶさ2探査連携会議を年一度ずつ開催するとともに、系内と系外の惑星科学の融合を図るため平成28年度にはフランスのニース郊外にて、平成29年には東京大学にて国際研究会を開催した。前者のセミナーからは、はやぶさ2探査機、欧州の MASCOT 着陸機、米国の OSIRIS-REx 探査機の3者のデータ連係解析の議論が進み、Space Science Review 誌の特集号に結び付いた。後者のセミナーからは、太陽系で言えば現在の小惑星帯に位置したと考えられるスノーラインで起こる物理化学プロセスが、惑星系形成、さらに地球の水や有機物の由来を解明するための鍵を握ることが明確になった。

## ○研究者交流

### 【概要】

平成28年度には、太陽系探査、惑星形成理論、系外惑星観測の3グループから若手研究者1人ずつ米国とイスに派遣した。平均23日間という比較的長期の海外派遣を行い、相手国との交流関係の基盤を作ってもらった。平成29年度以降は、飛騨高山でのサマースクールによって海外の第一人者と face-to-face で議論する機会を得た若手研究者に渡航計画書を書いてもらい応募してもらう形を取って派遣研究者を選んだ。さらに、日本側拠点機関などの若手のみに偏らず全国の若手研究者に機会が与えられるよう公募の機会も設け、渡航計画申請は広く学術コミュニティから受け付けて選考した。適切と認められた計画を翌年度の研究計画に盛込んだ。これにより、若手研究者が事前に渡航予定先との連絡を含む準備を行い、自らの企画で渡航するという自覚を持たせることができた。この結果、平成29年度には18名の若手研究者の海外渡航が実現し、下記のように2名が欧州での系外惑星観測プロジェクトのポストドクの職を得ることに繋がった。

さらに、この若手研究者の交流を通じて、日欧米の間の小惑星探査データの連携解析の枠組みができたことも大きな成果であった。日本の若手は、母船はやぶさ2の全球観測データを持って欧州の宇宙機関に飛び、欧州が提供した子機である MASCOT 着陸機のデータ解析に参画する。逆に欧州の若手は MASCOT の表面の顕微鏡観測データを持って日本に飛び、はやぶさ2のデータ解析に参画する。同様に日米の間では、はやぶさ2と ORISI-REx の両プロジェクト間で若手を通じたデータと人の交換が進んだ。この交換により、母機データと子機データを有機的に結びつけて解析する科学者間の連携関係やアカデミックな情報交換関係が推進され、多くのグループにおいて共同論文の執筆の段階まで至っている。この関係は、単に現在進行形の探査機からの科学成果創出に役立つだけではない。日本の若手研究者が欧米の次世代リーダー候補たちと共に国際連携活動の中核を担う体制ができており、彼らが国際的なリーダーとして育っていく機会を与えられる体制が築かれた。

(2)(1)の研究交流活動を通じて、申請時の計画がどの程度進展したか、「学術的側面」、「若手研究者の育成」、及び「研究交流拠点の構築」の観点から記入してください。

## ○学術的側面

第一の太陽系内探査に関する成果は、平成30年度に日米欧の探査機の観測のピークを迎える小惑星に関する知見である。一つは、本事業で構築された国際ネットワークを活かして小惑星リュウグウの世界各国の観測データをコンパイルできたことと、各国の大望遠鏡による追加観測が実現したことである。以前には小惑星リュウグウは、Cg 型ないし狭義の C 型のスペクトルを持ち、米国の OSIRIS-REx 探査機が目指す小惑星ベヌーとは明らかに異なると考えられてきた。しかし、平成28、29年度に得られたデータからは、そのスペクトルの分布域は以前の推定よりずっと広く、ベヌーが属する B 型から Cb 型までカバーすることが判明した。両小惑星は軌道力学的には極めて類似しているため、スペクトル型の一致は、両小惑星の母天体が同一である可能性が出てきたのである。さらに、このスペクトル型は、ポラナ族と一致しており、ポラナが両小惑星の母天体であることを示唆する。また、ポラナ族は、地球に衝突する小天体を最も多く供給する小惑星内帯にある最大の低アルベド小惑星族の母天体である。そのため、ベヌーとリュウグウの表面詳細観測とサンプルリターンは、地球史において最も多くの水や有機物を供給した母天体の起源と進化を解明することになるかも知れない。

はやぶさ2探査機の到着成功によって、小惑星リュウグウの姿が明らかとなったが、本課題で得られた知見は小惑星リュウグウの解釈に大いに役立つものである。小惑星リュウグウの表面には、幾多の巨大岩塊（自身の直径の2割を超えるサイズ）が見つかり、リュウグウの母天体の様々な深さからやってきた可能性が見えてきた。このような母天体の調査にまで踏み込んだ小惑星探査はかつてない。今後の試料採取

への期待は、到着前に比べて遥かに高まった。既に、重力や地形の分布図は完成し、形態観察から南北方向に卓越した表面流動の証拠が集まってきた。その結果、リュウグウの極域のある巨大岩塊群と赤道を取り巻くリッジを構成する物質の関係も明らかになりつつある。探査機の工学的制約から、極域には着地・サンプル採取はできない。しかし、着地に適した中緯度や赤道域にも、極域の巨大岩塊と同じスペクトル特性を持った小岩塊や土砂が見られるため、両者の相互解析から母天体内の構造解明ができると期待される。このような探査データ・試料の分析から太陽系内の水・有機物の微惑星への取り組み過程と輸送過程に極めて強い制約条件を課すこととなることは確実である。

第2の系外惑星観測に関する成果は、次世代の系外惑星観測衛星が目指すべきサイエンス面のビジョンが見えてきたことである。しかも、それが James Webb Space Telescope (JWST) のような巨大な観測衛星ではなく、超小型衛星によるポイントを絞った小型計画で実現できる可能性が高いことが分かったことが非常に重要である。

現在の世界の系外惑星観測では、技術的な点で検出の比較的容易な低質量の恒星（赤色矮星）まわりの惑星に注目が集まっている。それらは、惑星系の構造や惑星環境に関して太陽系とは大きく異なるが、原始惑星系円盤内での物質移動や大気散逸等の惑星の進化、多様な環境下にある惑星大気の特性等に関する新たな知見をもたらしている。そうした知見は、太陽系および地球の形成過程の理解に欠かせないものである。一方、大きな多様性の中で、太陽系、そして我々をもたらした要因を究明するためには、太陽系に非常に似た惑星系の間で見られる差異を把握することが重要である。特に、ハビタブルゾーンの惑星だけでなく、木星のような巨大ガス惑星の存在や、太陽系で言えば小惑星帯が位置するスノーライン付近に存在する天体に関する情報が鍵となる。

しかし、赤色矮星まわりの惑星系の検出とは対照的に、太陽のようにサイズの大きなG型星では、惑星と中心星のサイズ比が小さく、トランジット観測による惑星検出が難しい。さらに深刻なことは、太陽系のように広がった惑星系の場合、公転周期が長いためトランジットの機会が少なく、惑星は検出が大変である。これらのことがネックとなり、観測計画の企画段階で足踏みをしているのが世界の現状である。

このような中であって、本事業に参画する研究者は、相手国研究者との連携の基に米国の系外惑星観測衛星 Kepler (2013年打上) および TESS (2018年4月打上)、スイスの Cheops (2018年打上げ予定)、欧州宇宙局の PLATO (2026年打上予定) の研究グループとの交流を通じて、先行する彼らの衛星計画の問題点および改善点をつぶさに考究することができた。その結果、日本が打上げるべき次世代系外惑星観測衛星のあるべき姿を描くことができた。具体的には、Kepler のように遠方にある暗い星でなく、TESS のように赤外光で光る星でなく、Cheops のように天球の狭い領域にある星のみでなく、PLATO のように太陽型星であるがハビタブルゾーンに止まることなく、天球全体に分布する明るい太陽型星を小型軽量の広角望遠鏡で長期間計測することが重要であることが判明した。このような望遠鏡の観測には、TESS や PLATO のような 300~500 kg の小型~中型衛星を打上げる必要はなく、予算が格段に少ない 50 kg の超小型衛星で十分である。さらに、米国の TESS 計画以降は欧州の PLATO 計画まで 8 年以上も全天サーベイ型の系外惑星観測衛星計画は存在しない。このような時間的なギャップを埋めて TESS の寿命が尽きる前（おそらく 2023 年頃~）に打上げ、PLATO が打上がるまでに明るい星の全天サーベイを行うことは、太陽系近傍恒星の周りの長周期惑星の検出に極めて有効である。さらに、このような超小型衛星に搭載すべき小型カメラは、はやぶさ2探査機搭載のカメラと同クラスであるため、太陽系探査グループと系外惑星科学グループの協働により機器開発面の技術検討からサイエンスの共同研究まで一気に進められる状況である。

第3の成果は、両者を繋ぐ惑星形成論における新しい知見を得たことである。端的に言えば、水惑星やハビタブル惑星の形成の鍵を握るのは、それらが現在位置する場所（中心星に近い場所）ではなく、それより遠いスノーライン（揮発性成分の凝縮限界線）付近の物理化学過程であることが分かったことである。古典的な惑星科学研究は、ハビタブルゾーン付近での現象にフォーカスされてきた。しかし、近年の系外惑星観測や ALMA に代表される原始惑星系円盤の観測は、含水小物体や惑星が原始惑星系内を大移動したことを明らかにしつつある。地球のようなハビタブル惑星の形成は、惑星系全体のダイナミックな形成過程の中に位置づけて考える必要がある。こうした中、ニースモデルやグランドタックモデルなど巨大惑星移動を考慮した（京都モデルに代わる）新たな太陽系形成シナリオを提案したフランス拠点機関コートダジュール天文台や、ペブルとよばれる小物体の集積を惑星成長過程に組み込み新たな惑星形成理論を構築しようとしているスイス拠点機関ベルン大学の研究者らとの研究交流、さらに、東京大学で主催したワークショップでの欧米の研究者らとの交流によって、太陽系で言えば現在の小惑星帯に位置したと考えられるスノーラインで起こる物理化学過程が、惑星系形成、さらに地球の水や有機物の由来を解明するための鍵を握ることが明確になった。

### ○若手研究者の育成

本課題では、国内外を問わず活躍できる若手研究者の育成のため、初年度に Summer School で若手研究者に海外研究者との本格的な研究交流のきっかけを掴んでもらい、第二年度から長期海外渡航を行ってもらい、各グループの国際行動研究の中核を担ってもらうという3段階方式を推し進めてきた。その結果、多くの若手が海外探査機や観測衛星の運用や科学解釈の重要な位置を占めるに至っている。

さらに以下のように、ポストドクや助教レベルの研究者が1ステップ上のポストを獲得することに繋がっており、若手育成に成果が出つつある。

- ・惑星形成理論研究グループの若手研究者2名が、ARIEL 衛星計画を中心とした欧州の系外惑星関係のプロジェクトで採用された。具体的には、東工大ポストドクの川島由依と東京大ポストドクの小玉貴則が、それぞれオランダのユトレヒト大とフランスのボルドー大のポストドクに採用された。いずれも、本課題での研究交流で国際的な評価を得て新しいチャンスをつかんだ事例である。
- ・太陽系内探査グループの大阪大の藪田ひかる助教が、広島大 地球惑星科学科の准教授に採用された。
- ・太陽系内探査グループの東京大 理学系研究科の吉岡和夫助教が東京大の新領域創成科学研究科の講師に昇進した。
- ・太陽系内探査グループの東工大の臼井寛裕助教が、東工大准教授を経て宇宙科学研究所教授に採用された。

さらに、本課題の拠点機関・参画機関の研究者が中心となって推し進めている「はやぶさ2」の科学観測は順調に推移しており、想定される中で最高の質と量のものになった。米国からは、データ提供との交換で様々な協力の申し出が届き出した。今こそ、このデータを若手に持たせて国際舞台に活躍の機会を与えるべき時である。我々は若手研究者の交換を通じた共同データ解析に最も価値を置いていることを伝え続けている。その結果、本課題で渡航した若手研究者の多くが OSIRIS-REx の中核に食い込むことに成功している。本課題後半における若手育成のさらなる成果が期待できる状況が築かれた状況である。

### ○研究交流拠点の構築

平成29年度4月に本事業の拠点機関である東京大学理学系研究科に宇宙惑星科学機構が設置され、恒久教授ポストが配置された。同年9月に橘省吾教授が赴任して教育研究活動を推進している。本事業の終了後には、この新設の機構がビッグバンセンターと協力して、本事業で構築した国際協力ネットワークの維持発展の中核となる予定である。さらに、平成30年度に発足した東京大学に宇宙地球フロンティア国際

卓越大学院とも連携して大学院生の国際交流を促進していく予定である。



#### 4. 事業の実施体制

本事業を実施する上での、「日本側拠点機関の実施体制」、「相手国拠点機関との協力体制」、及び「日本側拠点機関の事務支援体制」について記入してください。

##### ○日本側拠点機関の実施体制（拠点機関としての役割・国内の協力機関との協力体制等）

日本側拠点機関の事務局としては、コーディネーターの杉田精司（東京大学 理学系研究科・教授）が全体統括を担当し、共同研究 R-0 1（太陽系内小天体探査）代表者の杉田精司、共同研究 R-0 2（系外惑星観測）代表者の須藤靖（東京大学 理学系研究科・教授）、共同研究 R-0 3（惑星形成理論）代表者の生駒大洋（東京大学 理学系研究科・准教授）がそれぞれの参加研究者からの派遣計画申請をとりまとめ、適切な運営を行っている。また、若手研究者の長期海外派遣については、共同研究者の數田ひかる（広島大学 理学系研究科・准教授）が公募から派遣手続きまでのマネジメントを担当している。協力機関とは、それぞれのテーマに沿って定期的にミーティングを行っている。協力機関の JAXA 宇宙研をはじめとする「はやぶさ2」探査機チームの基幹機関（名大、阪大、立教大、会津大、千葉工大、高知大）とは、毎木曜に週例会を開催している。系外惑星観測に関する研究ミーティングも国立天文台や立教大と定期的で開催しており、系外惑星観測の立案作業を理論とハードの両面から進めている。これらの国内体制を基盤に右図のような国際協力ネットワークを構築している。



本課題の国内外の実施体制概念図

##### ○相手国拠点機関との協力体制（各国の役割分担・ネットワーク構築状況等）

日本側拠点を中心として、お互いが優位とする知見を持ち寄り、相補的に研究交流を進めることで、日米欧の観測計画における共通課題の解決を目指している。各国拠点の役割分担とネットワーク構築状況は以下のとおりである。

###### ・米国側拠点（アリゾナ大学）：OSIRIS-REx 探査機を通じた連携研究

アリゾナ大は、米国版はやぶさ2とも呼ばれる OSIRIS-REx 小惑星サンプルリターン探査の実施研究機関であり（NASA から約1000億円の包括契約を請負っている）、探査計画に持つ影響は極めて大きい。この探査計画の責任者である Dante Lauretta 教授が米国側拠点のコーディネーターとして本課題による連携研究にコミットしていることは、今後の日米の惑星探査における連携関係の強化の観点において大変重要な意味がある。これまでの交流活動によって、探査機の光学航法に必須の小惑星形状モデルの交換、画像データの交換などが詳細に取り決められ、探査データの取得を待つばかりの状況である。

さらに米国側は、アリゾナ大からのマッチングファンドに加えて、NASA 本部がはやぶさ2参加のための研究プログラム（Hayabusa 2 Participating Scientist Program（総額約6億円/5年間））を立上げて6名の研究者を日本に派遣しており、実質的に巨大なマッチングファンドとして機能している（Solicitation: NNH 15ZDA001N）。このプログラムの米国研究者たちは日本側に大変に協力的であり、はやぶさ2の小惑星着陸予定日付近に開かれる米国天文学会惑星部会（AAS/DPS）に「はやぶさ2」特別セッションを企画する一方で、OSIRIS-REx 到着直後の米国地球物理学会(AGU)でははやぶさ2・OSIRIS-REx 共同特別セッションを企画するなど、両国の協力体制が両探査機の連携と振興に結実しつつある。

・ スイス側拠点（ベルン大学 (PlanetS)）：CHEOPS 衛星・ HARPS 装置を通じた

ベルン大学を中核とした系外惑星科学に関する大学連携機構 PlanetS は、宇宙望遠鏡衛星 CHEOPS と地上望遠鏡による系外惑星サーベイ観測器 HARPS という本格的な観測プロジェクトを立ち上げており、欧州における系外惑星科学観測の中心拠点となっている。PlanetS 機構長である Benz 教授を本課題のスイス側コーディネーターとして迎え、田村元秀教授の主導するすばる望遠鏡の IRD との連携観測および生駒大洋准教授の主導する惑星形成理論に基づく共同観測提案を軸に国際共同研究を推し進めている。特に、Benz 教授と生駒准教授の間には本課題発足の何年も前から双方の大学の学生を共同指導してきた実績があるため、本課題での若手研究者の相互派遣は順調に進んでいる。また、生駒准教授が欧州の系外惑星専用近赤外観測衛星計画 ARIEL の海外招聘メンバーとして加わったこともスイスとの研究交流の成果である。

・ フランス側拠点（コートダジュール天文台）：小惑星探査機データと系外惑星観測データの理論統合

多数の世界的な惑星理論研究者を擁するこの天文台との共同研究は、本課題における理論的支柱の役割を果たす。特に、コーディネーターの Patrick Michel は、本天文台の惑星理論観測部門 (TOP) の部門長として系外惑星理論と太陽系探査の両者を統括する立場にあるため、本課題の大変に良い理解者である。自前の探査機を持たない彼らとの連携により、日欧米の 3 探査機のデータを虚心坦懐に解析する雰囲気醸成することができ、さらに系外惑星科学への展望もサイエンス価値重視で進めることができている。特に平成 29 年 2 月のニース郊外で開催した国際セミナーでは、惑星形成理論の世界的な権威である Morbidelli が主導して初期太陽系内での物質移動を木星がどの程度阻害したか (Jupiter Barrier 問題) を小惑星探査で制約できる可能性を示したことは今後の研究課題を検討する上で大変重要な指針となる。

・ ドイツ側拠点（ドイツ宇宙局 (DLR)）：MASCOT 着陸機を通じた連携研究

コーディネーターの Ralf Jaumann は、はやぶさ 2 探査機の子機として搭載された MASCOT 着陸機の総合責任者である。彼らとの連携により、はやぶさ 2 のリモートセンシング観測データと MASCOT から得られる小惑星リュウグウ表面のマイクロ分析データを交換して、共同解析する体制が確立した。DLR と日本側の双方から、3 名ほどの若手研究者が相手機関に長期滞在して解析手法の開発を行っている。さらに、はやぶさ 2 の小惑星リュウグウ到着後には、DLR が持つ大量の小天体画像データ (ROSETTA 探査による彗星、DAWN 探査によるセレス、ベスタ) とリュウグウの画像解析を共同で行っており、探査推進および科学成果創出の両面で極めて効果的な協力体制が築かれている。

○ **日本側拠点機関の事務支援体制（拠点機関全体としての事務運営・支援体制等）**

事務手続きに関する支援としては、日本側拠点機関である東京大学ビッグバン宇宙国際研究センターの経験豊富な事務組織（予算管理、出張旅費手続、国際会議運営、研究者招聘手続、来日後のサポートなど）が全面的にプログラム支援を行っている。特に同センターが事務支援した先端拠点形成事業「暗黒エネルギー研究国際ネットワーク」（平成 19 年開始）の運営で培った経験が大いに発揮されている。

また、はやぶさ 2 探査関連で一時期に多数来訪する外国人研究者の受入については、参画機関である宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の事務組織が対応にあたっており、宿泊場所から研究スペースの確保などまできめ細かいサポートを提供している。

さらに、東京大学に新設された宇宙惑星科学機構 (UTOPS) は、本課題で展開する国際交流活動を一般社会および研究者コミュニティに紹介するためのウェブサイトを立て、東京大学総合研究博物館の TeNQ と連携して様々なコンテンツの充実を図っている。特に社会への説明の一環としては、一般社会の関心の高い「はやぶさ 2」探査機に関する平易かつ正確な科学解説を発信している。