革新的“質量分析技術”開発で拓く宇宙・地球・生命科学

①　計画の概要

近年、我が国では海外メーカーの汎用分析機器を購入し、欧米で構築された分析手法を模倣し解析するだけということが多く行われており、現状では先駆的な研究を行なっていくことは難しい。一方で、大阪大学の質量分析グループは、1930 年代後半に国内で最初の質量分析装置を開発して以来、長い装置開発の歴史があり、二重収束質量分析装置『CQH』や、マルチターン飛行時間型質量分析計『MUTLUM』のような世界に誇れる革新的な装置開発と、それらを用いた独創的な研究を行ってきた。本研究計画では、イオン光学系を独自にデザインできる大阪大学理学研究科が「核」となり、サンプル前処理やイオン化法に詳しい日本地球化学会や日本質量分析学会との連携のもと、世界に類を見ない”サイエンス指向型”の質量分析装置をデザインし、宇宙・地球・生命科学の最先端を切り拓くことを目的としている。

本計画のサイエンスターゲットは、はやぶさが採取する小惑星微粒子、火山や土壌で発生するガス、河川や海水析など多岐にわたるが、特に、[1]高感度・高空間分解能を追求することで拓く先太陽系史の解読と、[2]小型化を追求することで拓くオンサイト・リアルタイム地球惑星科学を２大課題に掲げ、新たな学問領域を創生する。さらにここで得られた技術は、[3]生体高分子などの網羅的解析（オミクス）や、[4]医療現場での疾病病態診断などの生命科学分野へと展開することができ「生命現象のメカニズム」などの知見獲得に繋がる。このように、「前太陽系史の解明」と「オンサイト・リアルタイム地球惑星科学の創成」という地球惑星科学の新たな学問領域開拓への技術的な挑戦を皮切りに、材料科学、ライフサイエンス、環境科学、農学など、様々な科学分野の発展において「扇子の要」となっている質量分析科学コミュニティー全体の基盤向上を目指す。

②　学術的な意義

分析対象は多岐にわたるが、計画全体として以下の二つの学問領域を新たに創生する。

[1]高感度・高空間分解能を追求した先太陽系史の解読：研究代表者らは、市販の装置ながら数ミクロンのはやぶさ微粒子の局所 U-Pb 同位体分析を行い、地球近傍小惑星の衝突・破壊史を世界で初めて明らかにした(Terada+ 2018)。現在計画中の装置開発に大型予算がつけば、市販の装置より空間分解能を２桁、感度を１桁上げることが達成でき、隕石中に稀に存在するプレソーラー粒子から太陽系誕生前の情報を引き出すことが可能となる。他方、分担者の平田は、多重検出器型 ICP-MS 質量分析計を改造し，世界に先がけてナノ粒子の元素・同位体分析が可能な質量分析システムの開発に成功した（Hirata+ 2019)。このシステムは重元素合成過程の解明に応用できる。一般に地球惑星科学は「太陽系形成後 46 億年の事象」を扱う学問分野であったが、本計画により、宇宙開闢から太陽系の形成までの宇宙史の前半３分の２に実質的に切り込むことができ、学術的にも大きなブレークスルーとなる。

[2]小型化を追求したオンサイト・リアルタイム地球惑星科学：研究代表者の寺田は、月周回衛星かぐや搭載の質量分析計を用い、月面に到達する地球酸素の実測に成功し、人類の世界観を変えるパラダイムシフトを起こす一方（Terada et al. Nature Astronomy 2017)、同位体比を分析するには至らなかった。現在開発中の小型・高質量分解能の装置開発が実用化すれば、火山ガス、地下水などの地球化学的データをオンサイト・リアルタイムで同位体モニタリングが可能となる。

さらにここで得られた技術は、[3]生体高分子などの網羅的解析や、[4]医療現場での疾病病態診断などの生命科学分野へと展開することができる。

③　国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

現在、国内外の地球惑星科学の研究機関に汎用質量分析装置が配備され強力なツールとなっている。しかし世界的なシェアを担っているのは数社であり、分析技術の独自性は希薄である。我が国が同分野で世界を牽引するためには、各研究テーマに特化した、独創的な装置開発が必要不可欠である(かつて、UCLA では NASA の太陽風粒子採取計画に合わせ、SIMS と加速器マスを組み合わせたユニークな質量分析計を開発し大きな成果を挙げた)。「はやぶさ２」や、深海掘削船「ちきゅう」、国際宇宙ステーションによる「たんぽぽ計画」など国家的なリターンサンプルや、惑星探査機搭載型超小型 MULTUM に対し、分析・研究開発の面でも日本独自の装置の開発が急務であり、時機を得た提案であると言える。

一方、生命科学の分野では、アルツハイマー病等の三大疾病に伴う代謝変化を、銅の同位体組成異常により検出する試みが国際的に進んでいる。分担者の平田は、Ca、鉄、銅、Mo の精密同位体と微量元素イメージングを組み合わせることで、わずかな金属代謝変化を捉える研究を始めるなど、質量分析技術の学術シーズ共創の基盤が整っている。

④　実施機関と実施体制

空間分解能と感度を追求する大型の磁場型質量分析計 R&G 拠点として３拠点、小型化を追求した飛行時間型質量分析計 R&G 拠点として 10 拠点を設置する。イオン光学系は阪大でデザインし、分析試料の化学特性に左右されるサンプル処理部やイオン化部などは地球化学会、質量分析学会に属する研究機関で開発を行う。完成した新型装置は全国共同利用設備として広く享受するとともに、質量分析のアナリティカル・テクニカルな知見も共有し、材料科学、ライフサイエンス、環境科学、農学などの様々な科学分野の発展において「扇子の要」となっている質量分析科学コミュニティー全体の基盤向上に役立てる。

＜大型磁場型質量分析計 R&G 拠点＞

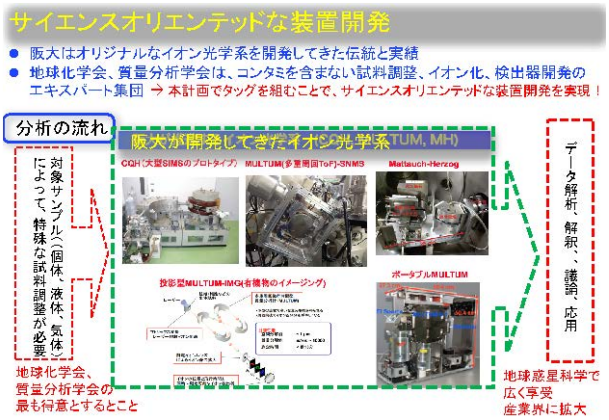
大阪大学：研究総括拠点、および飛行時間型質量分析計(Post-Ionization SIMS)、東京大学：大型磁場型質量分析計(全元素同時分析 LA-ICP-MS)、高知コアセンター：大型扇形磁場型質量分析計(MEGA-SIMS)

＜小型飛行時間型質量分析計 R&G 拠点＞

東京大学：火山ガス MULTUM、JAXA:探査機搭載 TULTUM、筑波大：堆積岩 MULTUM、JAMSTEC：潜水艇 MULTUM、名古屋大学：生物地球化学 MULTUM 大阪市環境研究所：河川水 MULTUM、東北大学病院：薬学用 MULTUM、大阪大学：医学歯学用 MULTUM、北海道大：土壌学 MULTUM、京都大：農芸化学用 MULTUM

⑤　所要経費

ポストイオン化 CQH 型質量分析装置の開発（阪大）	10 億円
完全多元素・多同位体同時質量分析計（東大）	10 億円
高感度 MEGA-SIMS の開発（高知コアセンター）	10 億円
FIB-MULTUM 型質量分析装置の開発（阪大）	５億円
投影型有機物質量分析計（阪大）	２億円
惑星探査用小型質量分析計の開発（JAXA）	２億円
潜水艇用小型質量分析計の開発（JAMSTEC）	２億円
環境モニタリング用小型質量分析計の開発（東大、つくば）	４億円
人為影響ジオミクス（鳥取環境科学大学）	２億円
生体地球化学（名古屋大学）	２億円
生物圏環境ジオミクスの開発(京大、北大)	４億円
医療診断用小型質量分析計の開発（東北大病院、阪大）	４億円
加速器質量分析装置の開発（東京大学・総合研究博物館）	５億円
新規准教授ポスト２名、研究員６名（×10 年）	５億円
装置附帯設備（各機関）	２億円
新規建物（阪大）	５億円
合計	74 億円



⑥　年次計画

本計画の最初の３年は、現在基礎技術開発をしている部分を発展させる。まず一つ目は、高精度の局所同位体分析測定のためのポストイオン化 CQH 型質量分析装置の開発で、３年後には現在の感度数十 ppm から 1ppm へ向上させ、実用化を目指す。２つ目の柱は、小型かつ可搬型の多重周回飛行時間型質量分析計(MULTUM)の開発で、すでに培養土壌からの脱ガス分析、歯周病患者の唾液の分析など実験室レベルでは実績がある。今後は電源周りの小型化をすすめ、屋外で使える仕様を３年で達成する。

一方、大型磁場型の質量分析計である完全多元素・多同位体同時質量分析計や、SIMS と加速器質量分析計を組み合わせた MEGA-SIMS は、大型の磁場マグネットを製作するのに費用がかかるため、開発の目処は立っていない。しかしながら、完全多元素・多同位体同時質量分析計で採用する「Mattauch-Herzog 型」イオン光学系は既に試作し性能評価をしており、技術的には実現可能な状態となっている。これらは５年を目処に設計／開発し、７年で実用化できると見込んでいる。

母体が大阪大学であるので、教育基盤体制は整っており、夏の学校や STEP10 制度を利用した次世代を担う学生の基礎教育や、企業エンジニア向けの「先端計測リカレント教育」や研修を行う。期間終了後は、リノベーションセンターなどを通し受注を受けた分析費用で年間 200 万円程度のランニングコストを回せるよう努力する。

⑦　社会的価値

【国民の理解／知的価値】本計画は「宇宙・地球・生命という人類の好奇心（大命題）への挑戦」であり国民の理解は得られやすい。逆に、この人類古来の課題に実質的に切り込むには、本技術開発が不可欠である。

【経済的・産業的価値】本計画は、島津製作所／日本電子ほか企業が 90%を占める日本質量分析学会と連携しており、応用分析のみならず製品化への道筋はある。すでに阪大の MULTUM 技術をベースとしたベンチャー企業も立ち上がっており、経済的・産業的な波及効果の見通しは明るい。

【SDGs への貢献等】ここで得られた質量分析技術を、歯科医用 X 線 CT や簡易放射線検出器のように普及させることができれば、呼気や唾液や血清のオンサイト診断や、個々の店舗における品質検査など、高品位の安全安心データを国民が広く享受できる新しい社会基盤が実現する。このように、本領域の研究開発とそこから期待できる成果は、SDGs の定めるゴールの（３全ての人に健康と福祉を）（９産業と技術革新の基盤を作ろう）（12 作る責任、使う責任）に資する。

⑧　本計画に関する連絡先

寺田　健太郎（大阪大学大学院理学研究科）

戦略的火星探査：周回・探査技術実証機による火星宇宙天気・気候・水環境探査(MACO)計画

①　計画の概要

今後の太陽系探査において、生命生存可能(ハビタブル)環境の形成と進化の探求が重要な科学目標となっている。その中で火星は、過去にハビタブルな環境を保持し、進化の過程でそれを失った地球外太陽系天体として、国際的にも重要な探査対象である。2030 年代には国際協働による火星サンプルリターンが計画されており、そこで日本が主導的な役割を果たすためにも、我が国独自の火星探査の実施が喫緊の要請である。本計画は、国際協働宇宙探査に向けた我が国の戦略的火星探査の重要なステップとして位置づけられており、我が国の宇宙基本計画の太陽系探査のプログラム化の方針とも合致している(図１)。近年の先行火星探査における新発見も踏まえ、本計画の目的は、ハビタブル環境の持続性の理解に向けて、火星における宇宙天気・気候・水環境の探究と、着陸探査に向けた探査技術実証である。特に、極端な太陽変動への瞬時応答を調べることで、過去 40 億年にわたり宇宙への大気散逸が火星の気候変動にどのような影響を及ぼしてきたのかを理解するとともに、火星をとりまく宇宙環境の把握と、将来の着陸探査に必要な技術獲得、表層・浅部地下水環境の調査を行う。

図１ 我が国の火星探査プログラム化(©JAXA)における MACO 計画の位置づけ.

上記の目的実現のため、本計画では３つの達成目標と、対応する８つの観測項目を設定し、11 の科学機器を搭載した火星探査を実施する（図２)。本計画は、過去の太陽で頻発した極端現象への瞬時応答の理解を通して、従来の統計的描像から脱却した火星気候変動機構の推定を可能とし、火星宇宙天気・気候研究にブレークスルーをもたらすと期待されている。また、宇宙放射線環境や表層・浅部地下水環境など、将来の火星有人探査に不可欠な知見を提供することで、人類の活動領域の拡大に貢献する。さらに工学的には、重力天体突入・降下・着陸に関する探査技術実証により、航空宇宙工学、ロボット工学等の幅広い発展が促され、総合的な技術の体系的な獲得が可能となる。

②　学術的な意義

生命生存可能(ハビタブル)惑星成立の条件は何なのか。この人類の根源的な問いに対し、今後の太陽系探査において、太陽系におけるハビタブル環境の形成と進化の探求が重要な科学目標となっている。約 40 億年前の火星は海を持ち湿潤な気候であったと推定される一方で、現在の火星は寒冷乾燥な気候をもつ。従って火星は、過去にハビタブルな環境を保持し、進化の過程でそれを失った地球外太陽系天体として、ハビタブル環境の持続性を調べるために国際的にも重要な探査対象となっている。火星がハビタブル環境を失った際の大規模な気候変動を引き起こすには、多量の水と CO_2 大気が地下に貯蔵もしくは宇宙空間に流出して表層環境から取り除かれる必要がある。その中で、過去の激しく変動する太陽条件下での宇宙空間への CO_2 大気の散逸機構の解明が、喫緊の要請となっている。すなわち、本計画で提案している、ICME などの極端な太陽変動への大気散逸現象の応答の観測は、過去の太陽で頻発した極端現象への瞬時応答の理解を通して、従来の統計的描像から脱却した過去への演繹を可能とし、火星宇宙天気・気候研究にブレークスルーをもたらすと期待されている。

多数の系外惑星が発見される中、主星の活動と惑星圏環境の関係を理解しようという宇宙気候探求の機運が高まっており、本計画で得られる知見は、系外惑星がどのような大気と表層環境を持ちうるか（ハビタブル環境を持つか否か）を推定する知的基盤を提供する。また、本計画で実現する宇宙放射線環境や表層・浅部地下水環境の把握は、将来の着陸探査や火星有人探査に不可欠な知見を提供する。本計画は、学術的な価値に加えて、人類の活動領域を火星へと拡大するために重要な探査である。さらに工学的には、重力天体突入・降下・着陸に関する着陸探査に向けた航空宇宙工学、ロボット工学等の幅広い発展が促され、総合的な技術の体系的な獲得が可能となる。

③　国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

今後の太陽系探査において、太陽系における生命生存可能(ハビタブル)環境の形成と進化の探求が重要な科学目標となっている。その中で火星は、上述のように国際的にも重要な探査対象になっている。2030 年代には国際協働による火星サンプルリターンが計画されており、そこで日本が主導的な役割を果たすためにも、太陽の影響を受ける大気と浅部地下環境の共進化過程に着目した我が国独自の火星探査の実施が喫緊の要請である。本計画は、この要請に応えるため先行探査の成果を精査し検討された JAXA 宇宙科学研究所(ISAS)の火星タスクフォース報告書にて、国際協働宇宙探査に向けた我が国の戦略的火星探査の

MMX に続く次の重要なステップとして位置づけられている。また、周回機部分は、JAXA/ISAS の火星大気散逸探査（のぞみ後継機）検討 WG 等を中心に検討してきた探査計画が母体となっており、日本学術会議のマスタープラン 2017 大型研究計画にも選定された。また、ISAS に各学界から提出された工程表のうち、太陽地球惑星圏研究領域の工程表(SGEPSS)と太陽系・系外探査プログラムの工程表(日本惑星科学会)に記載されている。

④　実施機関と実施体制

上述したように、本研究計画は、JAXA(宇宙航空研究開発機構)の科学衛星計画として実現すべく、宇宙科学研究所のリサーチグループおよび国際宇宙探査専門委員会の火星探査計画の科学探査タスクフォース(火星 TF)を中心に検討中の火星探査計画である。従って、今後、同研究所内でのミッション審査プロセスを経て選定された場合には、JAXA が主要実施機関となる。なお、計画の科学検討や科学観測用の搭載機器の検討開発については、以下の研究機関から約 90 名(学生を除く)の研究者が参画している。

JAXA 宇宙科学研究所、東北大学、東京大学、東京工業大学、大阪大学、大阪府立大学、福岡大学、京都大学、京都産業大学、北海道情報大学、情報通信研究機構、東京薬科大学、立教大学、千葉大学、千葉工業大学、日本大学、名古屋大学、金沢大学、滋賀県立大学、大阪電気通信大学、広島大学、神戸大学、岡山大学、高知大学、九州大学、九州工業大学、コロラド大学 LASP、カリフォルニア大学バークレー校 SSL、ダヌンツィオ大、韓国地質資源研究院、Royal Belgian Institute for Space Aeronomy、Swedish Institute of Space Physics.

⑤　所要経費

総経費：360 億円。

所用経費の大まかな内訳は、衛星システムの設計・製造・試験に約 190 億円、ミッション機器の設計・製造・試験に約 45 億円、地上系および JAXA からの支給が必要なシステム機器に約 20 億円、打ち上げ費用約 105 億円を想定している。上記のうち最初の２項目はマージンを含む。また、衛星設計・製造・試験経費の詳細については、一部メーカーによる見積りもあるが、非開示情報のため、内訳の記載は控えさせていただく。

⑥　年次計画

太陽変動への応答を調べるには、大きな太陽変動の極端現象(CME 等)が起こる太陽活動極大期（2023-25 年頃）からの減衰期(極大後２-３年間)をミッション期間に含むことが望ましいこと、戦略的に火星探査進めるために先行の MMX(火星衛星サンプルリターン)計画(2020 年代前半打ち上げ)に連続して遂行する必要があることを踏まえ、本計画では、2026 年の衛星打ち上げ（バックアッププランは2028 年打ち上げ)を目指して検討を進めている。今後の主な想定スケジュールは以下の通りとなっている。

～2019 年度　システム検討
2020 年３月頃　ミッション定義審査(MDR)
2021 年３月頃　プロジェクト定義審査(PDR)，
2023 年３月頃　詳細設計審査(CDR)
2023 年度　フライトモデル製造
2024 年度　一次噛み合わせ試験等
2025 年度～2026 年秋　フライトモデル総合試験、射場作業等
2026 年秋　打ち上げ
2027 年夏　火星到着
2027 年秋　科学観測開始
2029 年末　ノミナル科学観測終了

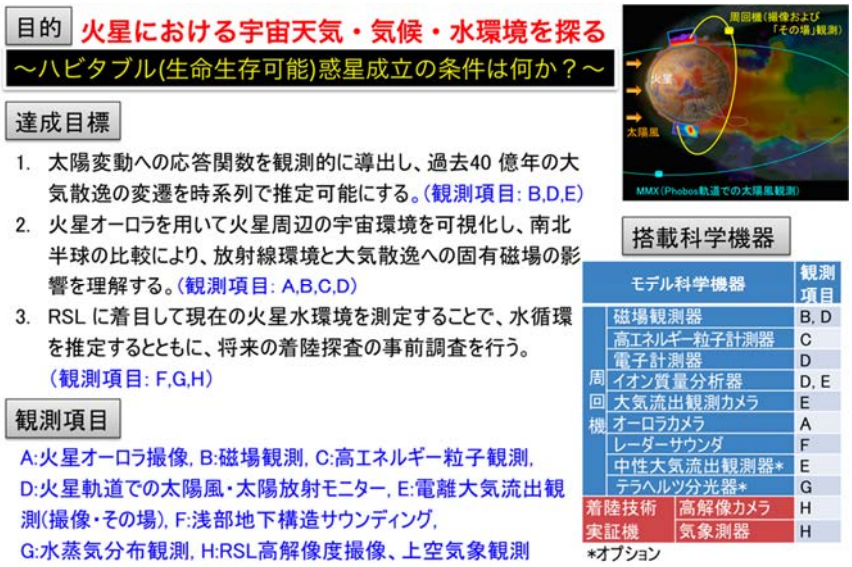


図２ 本計画の科学目的、達成目標、観測項目、およびモデル科学機器。

⑦　社会的価値

宇宙科学・探査は、人類の英知を結集して、知的資産を創出し、宇宙空間における活動領域を拡大するものであり、はやぶさ２などの我が国独自の探査の実施により、太陽系探査への国民の期待と理解が高まっている。その中で、地球型生命の生存可能なハビタブル環境の持続性を探る我が国独自の火星探査の実施は、学術的な意義だけでなく、科学教育や科学啓蒙に有用な題材を提供できる。また、世界最先端の科学成果、技術実証を通じ、科学、工学、数学など、幅広い分野での人材育成が見込まれる。

また、本計画により明らかになる、現在の火星周辺の放射線環境、火星表層での液体の水の有無、および地表からアクセス可能な浅部地下帯水層の空間分布は、将来の有人探査にも重要な知見である。国際協働での月周辺宇宙ステーション（ゲートウェイ）の建設が合意され、月から火星へと拡がる探査への民間参入の機運も高まっており、本計画は人類の活動領域の火星への拡大に貢献する。なお、重力天体への探査技術実証には、高度な総合工学技術が要求されるため、宇宙用ロボットの防災・減災への応用など、多様な産業シーズを包含しており、SDGｓにも貢献することが可能である。

⑧　本計画に関する連絡先

関　華奈子（東京大学・大学院理学系研究科　（地球電磁気・地球惑星圏学会、日本惑星科学会））

惑星探査コンソーシアムプロジェクト：太陽系における生命生存環境の探求

①　計画の概要

本計画は、太陽系における生命生存環境の探求を目的に太陽系探査を必要とする課題を議論整理し、探査計画の企画立案とその推進のために必要となる研究や、探査から得られたデータ・資料等の活用とその促進のための研究を多面的戦略的に展開し、今後の科学探査計画の設計とその適時的改善を行い、科学探査の実現と科学成果の抽出に資することを目指す。今日、「かぐや」、「はやぶさ」を経て、「あかつき」、「はやぶさ２」、「ベッピコロンボ（みお）」と、我が国も太陽系探査に本格参入できる実力を備え、世界からも貢献を期待されるようになった。国際協力事業として推進する国際宇宙探査の枠組も新設され、宇宙航空研究開発機構(JAXA)にあっては国際宇宙探査センターも設置され、その中で科学探査を実施する機会も訪れた。一方、天文観測の進展は、数多くの太陽系外惑星を発見し、惑星系形成領域も多数観測されるに至り、太陽系外での生命生存環境の可能性を議論することが世界の宇宙科学における中心的課題の一つとなってきた。このような背景にあって、太陽系の生命生存環境がいかに形成され持続的に存在しえたかを探査によって実証的に探究することは、太陽系のみならず惑星系一般の生命生存環境考察の礎であり、人類的課題であると言える。我が国もこれに貢献し、長期巨大プロジェクトたる太陽系探査の科学面を宇宙科学コミュニティが責任をもって担うべく、ここに、複数の大学等が参加し有機的に連携する多拠点ネットワーク型の「惑星探査コンソーシアム」を、JAXA を取り巻く形で構築する。「惑星探査コンソーシアム」によって、宇宙科学コミュニティは、科学探査経験の蓄積継承を行い、今後の太陽系探査計画の科学面の設計を主導し、必要となる研究開発と人材育成、国際協力活動等を進め、太陽系における生命生存環境の実証的探求を実現する（図１）。

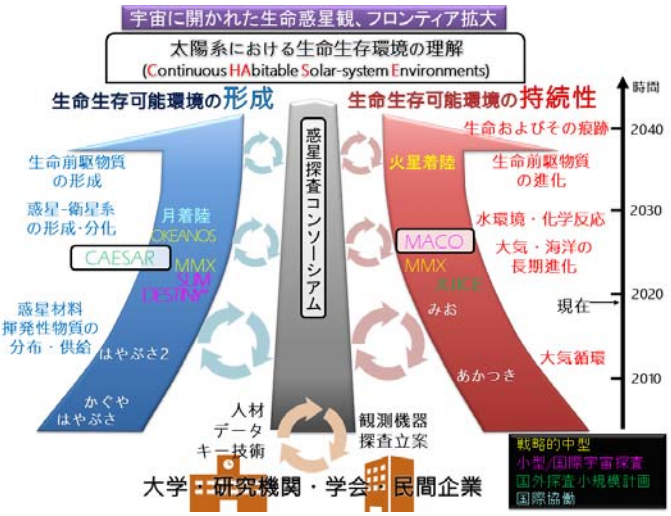


図１　宇宙科学コミュニティが企画する「太陽系における生命生存環境の理解」に向けた探査計画群と惑星探査コンソーシアムの位置づけ

②　学術的な意義

宇宙科学コミュニティに「惑星探査コンソーシアム」を組織し、太陽系科学探査の科学面からの検討と成果の抽出提供に貢献できる人員を拡充し、あるいは、これに当たる若手人材を実践的に養成し、長期にわたる研究・開発活動の継続を保証して、周辺分野とも連携する太陽系科学探査推進の核とする。これによって、過去あるいは世界の科学探査の経験と得られた知見を咀嚼継承し、将来の探査計画の設計にこれを活かし、相互の連携性を高めた持続的戦略的な計画群の立案が実現する。我が国の太陽系科学探査は、これまで個別独立的に立案実施されてきたが、その黎明期を終えた今日、より戦略的な展開が可能であり、かつ、必要とされる。個々の探査では断片でしか得られない太陽系の生命生存環境の形成と持続性の考察に至る手がかりを、国際協力も含めた複数の探査計画を相互に関係づけながら構成していくことにより、より確かな描像を得ることができる。

また、天文観測の進展により、数多くの太陽系外惑星の発見と惑星系形成初期ガス雲の観測が多数実現するに至り、太陽系外での生命生存環境の可能性を議論することが宇宙科学における中心的課題の一つとなってきた。太陽系での生命生存環境の形成とその持続という問題の探求はそれ自身が人類的課題であると同時に、現場調査・観測が唯一可能である太陽系で得られる知見は、現在天文観測の進展によって明らかにされつつある太陽系外の惑星系において、その生命生存環境の形成と期待される持続性を考察する際の礎となることが期待され、その科学的意義は格段に高まっていると言える。

③　国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

現在、我が国では政策的な国際協力事業として月および火星探査が重点化されており、MMX（火星軌道投入とその衛星探査）、SLIM(月着陸実証)、DESTINY+(深宇宙探査技術実証)が 2020 年代初頭の打ち上げを目指して計画されている。さらに、OKEANOS（外惑星領域大型帆型探査技術実証）の他、国際協力事業として JUICE（木星衛星探査）、CAESAR(彗星物質捕捉探査)、MACO(火星大気捕捉探査)などの計画が続いている（図１）。宇宙科学コミュニティにおいて本格的な企画立案に着手した MMX は区分Ⅱに、CAESAR、MMX 後の戦略的火星探査計画は区分Ⅰに別途それぞれ大型計画提案している。本計画は、これらの探査計画を、生命生存環境の形成と持続という見地から戦略的に連携させた一連の科学探査として位置づけ、宇宙科学コミュニティとしての議論を展開し、全体像を描き、これを共有するためのものである。探査計画の科学面の精錬度を高め、実現のあかつきには科学成果の抽出を最大化し、これを生命生存環境の考察に供し、研究会等の開催によって描像を得、これらを将来の探査計画立案にフィードバックする。

④　実施機関と実施体制

本計画では、大学等の様々な組織に分散する優れた資産を有する研究グループを拠点として位置づけ、その連携からなる多拠点分散ネットワーク「惑星探査コンソーシアム」を、JAXA を取り巻く形で構築する。全体の統括は神戸大・理 CPS（惑星科

学研究センター）（予定）が担い、（1）「人材育成」統括：神戸大理 CPS、（2）「研究開発」の推進統括：東大（予定）、（3）「探査計画（ミッション）立案」統括：国立天文台 RISE（予定）、という体制で推進する。（2）研究と開発の推進はその手法等により４つのプロジェクトを構成してこれを推進する。それらは、A「宇宙探査機器技術プロジェクト」統括：東大（準備中）、B「宇宙物質分析・実験プロジェクト」統括：東大（準備中）、C「宇宙探査データ活用プロジェクト」統括：会津大、D「宇宙探査シミュレーションプロジェクト」統括：神戸大理 CPS である。C 会津大、D 神戸大理 CPS はそれぞれの全学に認知された連携活動をすでに展開中である。さらに現時点で参画を了解している機関・部局等（多くは研究者レベルでの同意であるが部局等の了承に特に問題はない）は以下のとおりである。北大理/創成、国立天文台月惑星探査検討室（RISE）、東北大理/工、東大理/工/新領域/総文、千葉工大惑星探査研究センター（PERC）、東工大理/地球生命研（ELSI）、立教大理、海洋研究開発機構（JAMSTEC）、極地研、名大環境/宇宙地球環境研（ISEE）、京大理/生存圏研（RISH）、京産大理、阪大理、神戸大理/工、九大理であり、それぞれの強みを生かして A～D のプロジェクトに分散展開する。

⑤　所要経費

期間 10 年想定総額 267.3 億円

（1）人材育成 8.5 億円×10 年=85 億円

（2）研究開発総額 167.3 億円

拠点（重点）13 拠点

A:（設備・事業費 6 億＋研究職人件費）×５拠点

B:（設備・事業費 4 億＋研究職人件費）×４拠点

C:（設備・事業費 4 億＋研究職人件費）×２拠点

D:（設備・事業費 4 億＋研究職人件費）×２拠点

合計：設備事業費 62 億＋研究職人件費 66.3 億=128.3 億

拠点（萌芽）19 拠点

A:（設備・事業費 1 億＋研究職人件費）×３拠点

B:（設備・事業費 1 億＋研究職人件費）×９拠点

C:（設備・事業費 1 億＋研究職人件費）×２拠点

D:（設備・事業費 1 億＋研究職人件費）×５拠点

合計：設備事業費 19 億＋研究職人件費 20 億=39 億

（3）探査計画立案 0.5 億円×10 年＝５億円

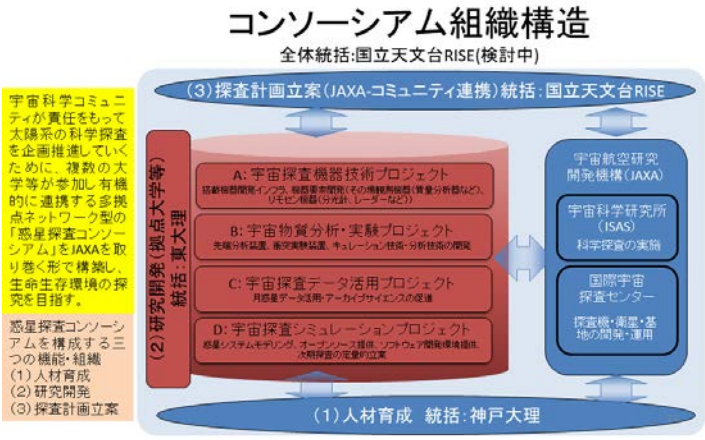


図２　惑星探査コンソーシアムの組織構造略図

⑥　年次計画

生命生存環境の探究を、太陽系探査（「かぐや」「はやぶさ」「あかつき」「はやぶさ２」「ベッピコロンボ」ならびに諸外国の探査）結果の整理提供と物質分析や比較実験の導入あるいはシミュレーションとデータ同化の活用等を徹底することで進め、今後の太陽系科学探査群の設計と最適化、必要となる機器開発・試行実験等を行う。生命生存環境の（A）形成には主に固体天体探査の情報が、その（B）持続性に関しては「あかつき」「ベッピコロンボ」等表層観測情報が関与する。計画は、（1）人材育成：各拠点に若手人員（博士課程毎学年 15 名とそのキャリアパスとしての博士研究員 60 名、特命教員 40 名）を年次進行で分散配置して実現、（2）研究開発：重点拠点には研究教育を主導するチームを新規導入、（1）の若手人員の参加も得て、［A 機器開発］搭載機器開発環境整備と機器要素開発（質量分析器、分光計、レーダー、検出器・分光素子など（0.3-1 億弱）、チェンバー（@0.3 億）、クリーンルーム（@0.3 億）を導入）、［B 分析・実験］キュレーション技術・分析技術の開発（「はやぶさ」「はやぶさ２」のための資料分析装置（@0.3-1 億）、衝突実験装置等（0.3-1 億）を導入）、［C データ］「かぐや」「はやぶさ」「はやぶさ２」等からの太陽系天体データの集積提供と解析、アーカイブ提供（情報基盤（@0.3-1 億）を導入）、［D シミュレーション］「あかつき」データ同化等の解析、惑星システムモデルの開発と探査シミュレーション（計算システム・ストレージ（@0.3-1 億）を導入）をそれぞれ実施、（3）探査計画立案：統括グループ３名による中核情報基盤維持と研究会開催、情報アーカイブ提供する。本課題期間終了後は、本課題での経験をもとにより安定した予算的裏付けの下で長期にわたる太陽系科学探査を担い、世界に対して応分の貢献を行う体制の確立を必要とする。

⑦　社会的価値

惑星探査の推進と成功は多くの国民、とりわけ若い世代に夢と希望をもたらす。また、太陽系と惑星の成り立ちの解明、その理解の上に明らかになる生命生存環境の形成と持続性の問題は、人類が共通に抱く根源的な好奇心につながる知的価値を有すると同時に、地球環境上に許容される人類活動の限界をも教えてくれる。本計画では、探査データの配信や知見ライブラリの提供も目的としており、これらは学際研究にとどまらず、理科教育あるいは一般市民の知的活動のためのコンテンツとして活用が期待される。産学協同による新しい搭載機器の時間をかけた企画開発は、センサー、ロボティクス、通信技術などの小型化・高効率化・高信頼度化等、さまざまな技術を先鋭化させ、企業側にも大きなメリットをもたらすことが期待される。産業界とのパイプを生かした理工連携による長期的な開発計画をデザインし、惑星探査データ高次解析や流体等の高機能計算機シミュレーション、データ同化などの情報技術面とあわせて、高度科学技術を担う人材の幾世と産業のイノベーションに資する。

⑧　本計画に関する連絡先

渡部重十・中本泰史・林祥介（地球電磁気・地球惑星圏学会（SGEPSS）・日本惑星科学会）

広域観測・微視的実験の拠点連携による沈み込み帯プレート地震メカニズム研究の新展開

① 計画の概要

沈み込み帯周辺地域では、地震・火山噴火など生活を脅かす事象が厚さ 100km のプレートの沈み込みにより発生する。本計画は、マスタープラン 2014 によるプレートの構造・地震活動探査とプレート物質を用いた地震過程再現実験を統合した、ネットワーク型拠点を構築し、μm～100km スケール横断研究により、プレートの全レオロジー断面を作成し地震の動的描像に挑戦する。

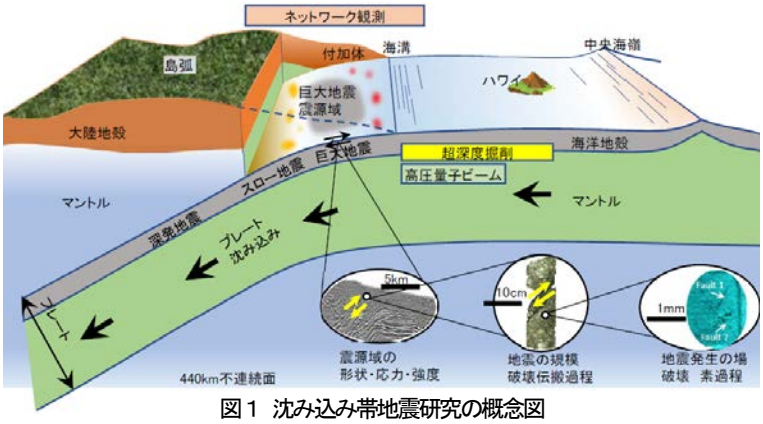


図１ 沈み込み帯地震研究の概念図

このため、観測網が不足している海底・地下圏で地震・地殻変動稠密観測網を、巨大地震発生の切迫性が高い南海トラフ域に優先的に整備する。海洋地殻・マントル最上部への超深度掘削により試料採取するとともに、微視的地震過程を再現するため。次世代量子ビームライン（放射光・中性子）を構築する。

実施主体は、東大地震研（ERI）/地震・火山噴火予知協（ネットワーク観測）、海洋機構/J-DESC（超深度掘削）、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（GRC）（量子ビーム実験）をハブとして推進する。ERI は地震・火山科学の、GRC は先進超高圧科学の共同利用・共同研究拠点として稼働中である。

地震津波観測網は 1990 年代以来 DONET・S-net・Hi-net・F-net・GEONET 等、日本周辺に整備が進み、大規模システム展開へ見通しが立っている。データは全国の研究者が利用できる状況にある。超深度掘削は、マントル到達を視野に海洋地殻上部掘削（ハワイ沖等）の準備が進んでいる。量子ビーム実験では、SPring8 のパートナーユーザー採択、及び J-PARC のパルス中性子源構築の大型科研費を獲得している。

本計画により飛躍的に強化される観測・実験体制を駆使し、世界に先駆けて地震発生等の予測科学研究を行う。社会学・工学と連携し持続可能な社会基盤の形成と国土強靭化に貢献する。

② 学術的な意義

東日本大震災等にみられるように、我が国は地球上で最も活動的なプレート収束域に位置する海洋国家であり自然災害「大国」である。プレート全深度レオロジー断面の構築と、地震の動的過程描像により、プレート境界地震（浅部～やや深発地震まで）のメカニズムの理解が飛躍的に進展し、その科学的予測の発展に貢献すると期待される。

第一に、沈み込むプレートの運動を、マントルとの力学的相互作用とそれ以外の要因（水の存在、鉱物の変形・変質など）に基づいて解くことができ、発生する地震メカニズムが予測できる。第二に、先駆的高圧放射光 X 線実験により、100km 深度までの条件下で、微小スケール（mm）で岩石の破壊実験を行い、cm スケールの岩石破壊実験・摩擦実験では困難だった、何が破壊を起こすのが、破壊の瞬間に何が起きるのかをその場で直接モニターすることがブレークスルーをもたらす。封圧下・微視的スケールでの震源決定、断層描像、鉱物・岩石・水変質過程を全て実現できるのは、日本では GRC のみである。

実験における微小スケールでの地震の特性と、実際の地震の特性を統合するための共通の尺度として、ｂ値（地震の規模と回数の関係の尺度）が有効である。ｂ値を用いた比較研究により、地震発生要因(例えば水)の特定に大きな進展が期待できるが、そのための高精度観測・実験が可能なのは本計画のみである。

本計画の進展により、地震学、火山学、測地学、物質科学、地球化学、放射光実験学、計算地球科学を統合した新たな「固体地球の予測科学」の創成に繋がる。また、地震発生の原動力となるプレート運動の根本的理解が進み、その成果はマントルダイナミクスモデルに組み込まれ、固体地球の進化過程を解き明かす新しい科学を切り拓く。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

地震・火山噴火予知研究は、昭和 40 年代から全国の大学･研究機関が気象庁や地方自治体等の防災関係機関と組織的な研究を推進してきた。平成 26 年からは社会への貢献を目指した「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」が開始され、引き続いて平成 31 年度から「同（第２次)」が開始される。

日本周辺の沈み込み帯掘削研究は、1970 年代から国際共同で推進されている。最近では IODP（国際深海科学掘削計画）として日本海溝や南海トラフ等で行われており、プレート境界断層の高速滑り履歴やスロースリップ検知など、顕著な成果を挙げている。またマントル掘削の実施も国際的に承認されている。

高圧放射光 X 線実験は、GRC を中心として世界に先駆けた実験を主導してきた。高圧下における鉱物の構造・物性実験を基にした静的な地球内部構造の研究から、動的高圧放射光 X 線実験の開拓が進められており、「大容量プレスを活用した動的地球深部科学の開拓（GRC 河野ほか)」が SPring8 のパートナーユーザー課題として採択された。また、J-PARC で供用ビームライン(BL)として運営されている高圧中性子 BL は大型外部資金を複数獲得して実現した。

④　実施機関と実施体制

本計画では、東京大学地震研究所(ERI)/地震・火山噴火予知研究協議会（予知協）（ネットワーク観測担当）、海洋研究開発機構(JAMSTEC)/日本地球掘削科学コンソーシアム（J-DESC）（超深度掘削担当）、愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター(GRC)（量子ビーム実験担当）をハブとして推進する。ネットワーク型拠点を構築し、定期的に研究集会・企画委員会を開催するとともに、学会セッションを主催する。

「予知協」は、ERI が中核となり、国立大学（北海道大、弘前大、秋田大、東北大、東京大、東工大、名古屋大、京都大、高知大、鳥取大、九州大、鹿児島大）、私立大学（東海大、立命館大）、研究開発法人（JAMSTEC、防災科学技術研、産業技術総合研）、省庁（国土地理院、気象庁、海上保安庁）他が実施する。GNSS 観測は、神奈川県温泉地学研究所を中心として大学等（高知工業高専、名古屋大、弓削商船高専）が参加する研究グループで実施する。

掘削研究は、掘削孔・コアを用いた研究を主導している国立大学（東北大、東京大、筑波大、神戸大、金沢大、名古屋大、高知大）・JAMSTEC を中核とした J-DESC により遂行する IODP と密接に協力し、国内・国際連携基盤を最大限に活用できる。

量子ビーム実験は、 GRC が高圧放射光実験分野における共同利用・共同研究拠点「先進超高圧科学研究拠点 PRIUS」として、国内外研究グループとの共同研究を推進している。高圧中性子 BL では、東京大地殻化学実験施設が主導している。

⑤　所要経費

●設備費 481 億円

海底地震津波観測ケーブルシステム(６点)： 240 億円

製作費 180 億円、設置費 60 億円

ケーブル接続型掘削孔観測システム(75 点)： 110 億円

GNSS ブイ観測システム（３点）： 21 億円

陸上次世代型稠密地震・火山観測システム（千点規模）： 10 億円

掘削コア分析解析拠点整備・維持：10 億円

高圧量子ビーム実験拠点：90 億円

分析拠点整備・維持 20 億円　　放射光 BL 建設 30 億円

高圧実験装置 20 億円　　次世代中性子 BL 建設 20 億円

●調査観測費(役務) 160 億円

長測線構造探査：５億円ボーリング調査・用船費：５億円

超深度掘削に係る事前調査・掘削調査経費：３カ所×50 億円＝150 億円

●運営費： 20 億円

海底ケーブルシステム運営費:２億円/年×５年＝10 億円

拠点研究機関運営(人件費を含む)：２億円/年×５年＝10 億円

合計 661 億円

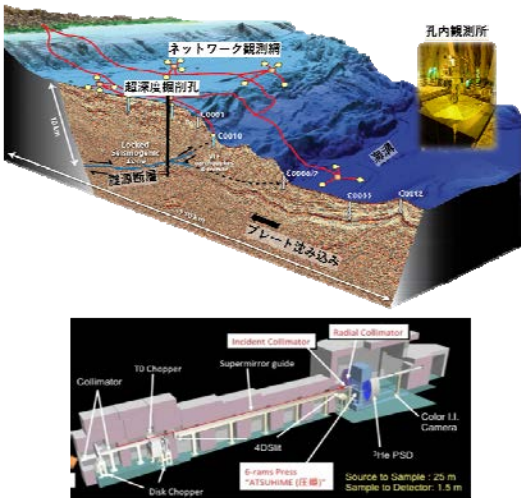


図２ 拠点整備の例
上：ネットワーク観測網、下：量子ビームライン

⑥　年次計画

●海陸ネットワーク観測

2019-2020 年度：システム設計と製作、ルート決定（構造探査・ボーリング調査）

2021-2025 年度：システムの海底敷設・設置

2026-2028 年度：試験運用

●超深度掘削

2019-2022 年度：拠点整備、南海トラフ地震発生帯掘削・ハワイ沖掘削検討

2024-2028 年度：マントル最上部掘削

●高圧量子ビーム実験

2019-2025 年度：分析拠点整備、放射光 BL 建設、高圧実験装置製作・設置、次世代中性子 BL 建設

⑦　社会的価値

災害大国日本は、地震・火山災害軽減に関して国民の期待が大きい。科学技術白書でも「我が国が直面する重要課題への対応」に地震、火山、津波などに関する調査観測や災害対応能力の強化に関する研究開発の推進が掲げられている。本計画により整備される海底ケーブル観測網や、S-net、DONET、孔内データを連動した高次空間観測網、そして超深度掘削・量子ビーム実験によるプレート物質を用いた地震過程再現により、沈み込み帯の地震発生の本質に迫り、世界に先駆けて新しい地震発生等の予測研究を推進する。この評価システムは、今後予想される南海・東南海地震の防災対策へ寄与し、社会的な重要性・緊急性が極めて高い。また近年の火山噴火の頻発も社会的な問題で、巨大カルデラの形成や噴火予測の研究が期待され、持続可能性な社会を探究する「Future Earth」の課題にも貢献できる。以上、人文社会学・工学との連携により、持続可能な社会基盤の構築と国土強靱化（SDGs「住み続けられるまちづくりを」）に貢献する。

⑧　本計画に関する連絡先

平田　直（東京大学・地震研究所）