

宇宙科学・探査ロードマップ

2026年 9月30日 E改訂
2023年 8月 9日 D改訂
2022年 4月 6日 C改訂
2021年 1月20日 B改訂
2019年 5月16日 A改訂
2013年 9月19日 制定

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所

目 次

**I . 宇宙科学・探査プログラムの進め方の
基本となる考え方**

II . 今後の宇宙科学プロジェクトの推進方策

III . 各分野の将来構想検討

宇宙科学・探査ロードマップとは

- 宇宙基本計画(令和5年6月13日)では4つの柱の一つとして「3. 宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造」が位置付けられている
- 日本(JAXA宇宙科学研究所)における宇宙科学・探査の活動は、研究者からの提案に基づくボトムアップを基本とし、プロジェクトを実行する形で機能させてきている
- 現状進められている研究・プロジェクト提案活動に基づき、一定規模で中長期的な計画を定量化し、実施案を策定することは、研究・プロジェクトの具現化の観点で必要なことである
- 「宇宙科学・探査ロードマップ」は、宇宙科学・探査の将来像を俯瞰し、研究者を中心に戦略性を持って宇宙科学・探査の中長期計画を示すものである

はじめに

- 本ロードマップは、第I章では宇宙科学とは何であるのかを述べる
- 第II章では、日本の宇宙科学を実行していく上でのツール群を概説する。ツールそれぞれの特長を理解し、宇宙科学プログラム全体として円滑に進めていくためのポートフォリオを意識した記述としている
- 宇宙科学とは何であり(第I章)、日本が持つツールが何であるか(第II章)を概説した上で、第III章では、実際のミッションの内容も含めて日本宇宙科学の将来構想を述べる。第III章では、日本の世界の学界における立ち位置、世界からの日本への期待ということを強く意識し、日本が世界の中においてすべきこと、また、日本が世界から期待される立ち位置を持続していくためにすべきことを記述した。時間軸として、～20年後までの発展も見据えた上で、次の10年間にいてすべきことは何かという形で記載している。

I . 宇宙科学・探査プログラムの進め方の 基本となる考え方

1. 取り巻く環境を踏まえた科学としての進め方の大方針
2. 宇宙科学・探査プログラムの進め方の基本となる考え方
3. 月と火星の探査における国際宇宙探査計画との連携

1. 取り巻く環境を踏まえた科学としての進め方の大方針

はやぶさ2の大成功と小型月着陸実証機(SLIM)による月面ピンポイント着陸技術の実証等をはじめとする世界第一級の成果を創出してきた。これにより、期待感と共に、日本の宇宙科学に対する世界の見る目が大きく変化し始めている。
また、国内においても、様々なメディア等を通じ、科学の成果を積極的に発信することにより、日ごろ宇宙と直接の関わりを持たない層からの応援も大きくなってきている。引き続き、宇宙科学・探査において世界第一級成果を創出し続ける。

一方、国内外の宇宙産業の裾野が民間利用や安全保障分野をはじめとし、急速に広がってきている中、その変化への対応が必ずしも十分ではなく、産業振興への貢献が乏しい傾向にあったことは反省すべき点である。基礎科学研究である宇宙科学を持続的に実施するために、国内の限られたリソースで効率的かつ効果的に進めるにあたっては、宇宙科学・探査分野だけへの裨益にとどまらない視点で、宇宙科学・探査プログラムを計画することが重要である。また、中長期的に成果を出すにあたり、本分野を支える人材育成(産官学)推進や基盤設備維持・強化への取組みも必要である。

このような取り巻く環境の変化を踏まえ、日本の宇宙科学を推進するにあたり、「科学者だけのための科学」とならないよう、日本の「ある種の豊かさ」を実感できるようにしつつ、国民や産業界をはじめ、様々な立場から持続的に応援したい・関与したいと思えるミッションを明示する必要がある。また、「ある種の豊かさ」を維持し護ることに貢献することも意識することも重要である。

そのために、人類として取り組むべき宇宙科学の課題を「大きな絵」で俯瞰し、その中で、取り巻く環境を踏まえ、日本の強みを活かし、どの課題に貢献をするかについて検討してきた。本ロードマップでは検討してきた中長期の計画である将来構想について示す。

1. 取り巻く環境を踏まえた科学としての進め方の大方針



日本の強みを活かし、
世界を先導する成果を創出

産業界

JAXA内各部門

連携

連携

宇宙基本計画、宇宙技術戦略、
宇宙政策委員会等

※ JAXA の宇宙科学・探査ロードマップを参考

世界を先導する
成果の創出

ミッションの確実
かつタイムリーな
実施

宇宙基本計画 工
程表に整合した個
別ミッション立上げ
(プロジェクト化)

戦略的中型計画
公募型小型計画
戦略的海外共同計画

宇宙科学・探査の将来像を俯瞰し、
戦略性を持った中長期の計画(宇
宙科学・探査ロードマップ)に基づ
き、宇宙理学・工学委員会等研究
者、宇宙科学研究所各種リソース
を考慮しつつ連携し検討加速

ボトムアップによるミッション提案

宇宙理学・宇宙工学委員会

宇宙科学将来ビジョン提言グループ(2025年度設置)
宇宙科学に関する中長期的(10~30年)な視点での議
論と提言を行うための組織
宇宙理工学合同委員会の下、三部会(太陽系部会、太
陽物理部会、工学部会)+統括部会で構成

研究者からの提案に基づくボトムアップを基本

積極的な発信による国民理解・応援
の更なる促進



2. 宇宙科学・探査プログラムの進め方の基本となる考え方

人類として取り組むべき宇宙科学の課題を「大きな絵」で俯瞰することは、日本としての中長期的な計画の戦略を理解するための大きな助けとなるため、次頁に詳細を示す。

本ロードマップが示す宇宙科学・探査は、宇宙に飛び出して宇宙のことを知る活動である。新しいパラダイムをもたらすような人類共通の知の創出と、人類の活動領域の拡大を目指し、宇宙理学の成果の創出、宇宙工学技術の革新をさせるものである。

宇宙の謎を探るための最先端の観測を行う理学ミッションを工学が支える、というひとつの伝統的な図式がある。つまり、理学からのニーズがあって、それを工学が満たすという構図である。これは上下関係と読まれるべきではなく、両輪を廻すことが宇宙科学を発展させていく上での肝である。

宇宙科学・探査プログラムの遂行は、宇宙についての人類の宇宙科学に対する謎への問いに答えるのみならず、その答えを求めて、より感度・精度の高い観測を実現すること、より遠くの宇宙へと到達すること、より自在性の高い宇宙機の構築をすることを目指すことで、人類の宇宙進出可能範囲を拡大することにも貢献している。その中で、既存の課題への答えを出す以上により面白い新しい課題を見出してもきている。

そうであれば、既存の宇宙理学的な問いに答え切らんとすることより、新たに問いを立て解きゆく道筋を構築することを重視する姿勢も十分に成立すると考える。そこでは、ちょうどよいサイズのミッションが頻度よく実行されることを目指すことになり、それにより、アカデミア・産業界とのインタラクションの頻度と質を高め、社会への貢献度を高めることに繋がる。

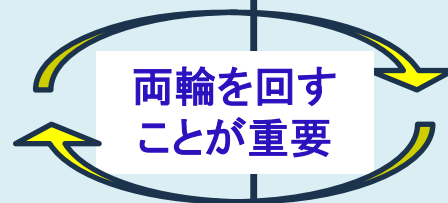
2. 宇宙科学・探査プログラムの進め方の基本となる考え方

人類として取り組むべき宇宙科学への理解

- ① 人類は身の回りの世界を理解しようとしてきた
- ② そして、地球が太陽を中心とする太陽系の惑星のひとつであることを見出した
- ③ その太陽は天の川銀河にある数千億個の星のひとつである
- ④ 天の川銀河は無数にある銀河のひとつであり、それは宇宙の始まりからの進化の結果である
- ⑤ ビッグバンにおけるごくわずかな密度の疎密をタネとして、宇宙における構造(星が銀河というまとまりを作って生まれ、銀河が銀河団という大構造をなすこと)が進化してきた
- ⑥ 宇宙初期においては、ほぼ水素とヘリウムしかなかった。星の内部で重元素が合成され、星の最期においてそれが宇宙空間にばら撒かれて次の世代の天体の材料となった
- ⑦ 重元素が塵となって太陽のまわりに円盤をつくったからこそ、そこから太陽系天体が生まれることになったのである
- ⑧ 太陽系の一つの惑星である地球が、いかにして生命惑星となったのか。これは最も知りたいことのひとつである
- ⑨ 天の川銀河系内の比較的近い星のまわりに系外惑星が見つかるが、そこに生命惑星があるのか。これは宇宙科学研究の焦点のひとつである
- ⑩ 人類が宇宙機に観測機器を搭載して宇宙のことを知る活動を展開してきたからこそ、この宇宙観を獲得するに至った。また、将来の有人探査を見据えた月と火星の探査が国際宇宙探査という枠組みで推進されており、ここへの効果的な貢献も重要である

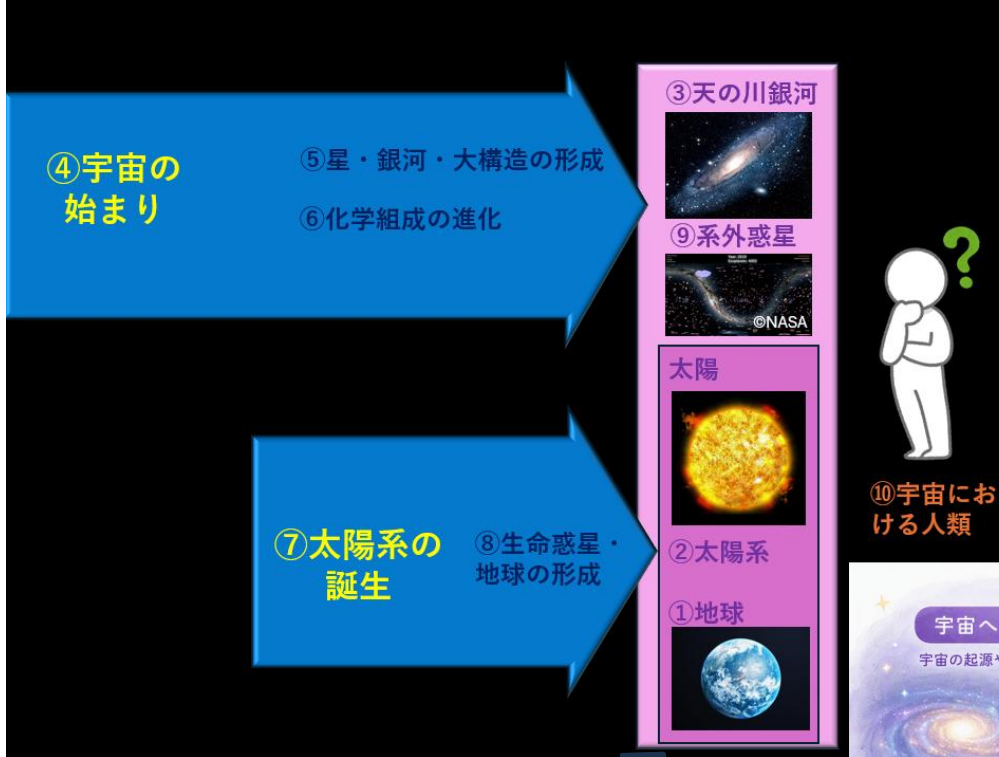
宇宙工学技術の発展への理解

- ① 人類共通の知を創造をするためには、活動領域を広げ、世界へ積極的に働きかける工学技術が不可欠である
- ② それは、宇宙工学・探査の観点では、地球から宇宙へのアクセス技術を高めたり、より遠くの天体へ到達したり、宇宙でより高度な技術を発揮することを意味する
- ③ そのようにして作られた飛翔体及び探査技術の実現が、新たな探査手段や、宇宙理学分野の創出を担ってきた側面がある
- ④ その裨益する先は、宇宙科学のみならず、広く宇宙産業ひいては社会システム全般へ先導的な示唆を提供するものである
- ⑤ 宇宙科学・探査プログラムの遂行は、宇宙についての人類の問いに答えるのみならず、遠くの宇宙、自在性の高い宇宙技術を目指すことで、光る技術を生み出し、もって人類の叡智のスパイラルアップ(問いと答えの無限の連鎖と進化)を加速する役割を担う
- ⑥ 宇宙科学研究としては、その具体的なステージとして、中・小型の宇宙機の開発運用、先進的なロケット・飛翔体、大気球及びそれらの高度化に資する周辺技術開発を推進し実行していく
- ⑦ すなわち宇宙理学的な問いを中心に据えるも、その問いに答え切らんとするよりも、問いを立て、解きゆく過程を重視するため、ちょうどよいサイズのプログラムが頻度よく実行されることを重視する。そうすることで、アカデミア・産業界とのインタラクションの頻度と質を高め、社会への貢献と技術・人材の持続可能性を両立させる



2. 宇宙科学・探査プログラムの進め方の基本となる考え方

人類として取り組むべき宇宙科学への理解



両輪を回す
ことが重要

宇宙工学技術の発展への理解



2. 宇宙科学・探査プログラムの進め方の基本となる考え方

宇宙科学の重要課題に対し、世界における日本の立ち位置の認識と、日本の持つ宇宙科学の各手段の特長を活かし、日本の独自性をもち、かつ、意義・価値の高い形でアプローチする

課題	世界の動向	中長期的に日本の取るべき戦略
謎(A)宇宙は現在の多様性をどのようにして獲得したのか	惑星、恒星、高密度天体、銀河、宇宙の大構造にいたる多様な階層の観測が進み、また天体形成以前のビッグバン約38万年後の最古の光である宇宙マイクロ波背景放射（CMB）や重力波の観測を通じたインフレーション仮説の検証を行うことが世界的にも課題とみなされている。Planck衛星等を経て、標準宇宙論（ Λ CDM）や天体现象の理解が進むと共に、系外惑星の観測などより精密な観測が必要となり、これまで地上からの観測を行ってきた波長においても、宇宙からの低擾乱かつ高精度の観測のための技術開発が、国際的に協調かつ競争的に進められている。新たな技術を用いた小型計画とESA/NASAのフラッグシップとしての大型計画が併存し、後者では国際協力の可能性もひらかれている。	課題解決に向け、戦略的中型計画規模で実施する計画、公募型小型規模での複数の望遠鏡衛星計画、戦略的海外協力により海外大型ミッションへの参画などを組み合わせ、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）や様々な天体の多波長での観測を推進する。この中では、日本が主導する国際協力によって、困難とされてきた観測に取り組むことも含まれる。
謎(B)地球を生命惑星とするプロセスはどのようなものであったのか	地球がどのように形成され、水や有機物を獲得して生命を育む環境へ進化したのかは、惑星科学の中心課題の一つである。近年は、外惑星の衛星群や、月・火星探査、小惑星・彗星探査を相補的に進めることで、この課題の解明が進められている。月・火星探査では、Artemis計画や火星有人探査に向けた活動を通じて、地球型惑星の形成・進化と居住可能環境の成立過程の理解が進展している。一方、小惑星・彗星探査では、OSIRIS-REx、RAMSES等を通じて、水や有機物の起源・輸送過程の解明が進められている。小天体は生命の材料を供給した可能性がある一方、大規模衝突による生物絶滅や生命進化を促す環境変動の要因でもあり、その理解は地球防衛の観点からも重要視されている。	日本は、乾燥状態で生まれそのままでは生命居住可能ではなかった原始地球に水をもたらした始原的小惑星から、サンプルを帰還させることに成功した実績を用い、生命惑星の形成という問題意識に基づき太陽系初期を探る上で効果的である小天体からのサンプルを計画する。また、地球型惑星の形成・環境変遷及び生命生存可能環境の成立条件を比較研究するため、月面探査及び火星本星着陸探査を行う計画を進める。
謎(C)地球以外の宇宙にも生命はあるのか	これまで6000個以上の系外惑星が確認され、地球サイズで生命居住可能領域（ハビタブルゾーン）にある候補も数十個発見されている。NASAのJWSTを中心に、大気中の水・二酸化炭素・メタンなどを分光観測し、惑星大気の状態を評価する段階にあるが、観測に最適なターゲットとなる地球型惑星の個数が十分でない。今後、ESAのPLATOやArielは地球型惑星の発見と大気の統計的理解を進め、地上大望遠鏡では近傍惑星の大気を高分散分光で調べる。更に、NASAの計画しているHWOIは、約25個の地球類似惑星を直接撮像し、酸素・水・メタンなどの生命兆候を探すことを目標としている。生命の発見のための候補の増加や選定・大気観測・偽陽性の理解を急速に進めている段階である。	出遅れている宇宙機による系外惑星観測に対し、国立天文台がリードしている地上望遠鏡による系外惑星観測からのアドバンテージを活かしつつ、海外計画への参加と小型計画を通じて貢献する。生命居住可能な系外惑星の直接観測を行う大型計画への参画を目指す。

2. 宇宙科学・探査プログラムの進め方の基本となる考え方

宇宙利用・宇宙科学の深化にともなって、より社会との接続が強い領域(拡張された宇宙科学)への貢献も意識をしてアプローチする

課題	世界の動向	中長期的に日本の取るべき戦略
(D) 地球防衛(プラネタリー・ディフェンス) 小惑星が地球に衝突し大災害を起こす可能性に対して、それを防ぐために方策を構築していく活動	地球への天体衝突リスクに備え、地球接近天体(NEO)の発見・追跡から特性把握、即応探査、軌道変更、災害対応、国際協力、アウトリーチ活動までを含むプラネタリー・ディフェンスの取り組みが世界的に進展している。NEOの発見個数は42,000個を超え、10個のNEOに探査機が送られている。NASAのDARTミッションによる世界初の小惑星軌道変更実験と、その詳細な検証を行うESAのHeraミッションによって、実際の脅威への対応を見据えた技術実証も進められている。さらに、2029年に地球に接近する小惑星アポフィスへの対応も進められている。また、国連の下でIAWN、SMPAGを中心に、観測対応や情報の共有、衝突リスク評価、実際に天体の地球衝突がある場合の対応の仕方の検討を行う国際的な連携体制が構築されている。	小惑星探査で世界をリードしてきている日本が、この活動に加わることは世界から期待されている。実際、2029年4月13日に小惑星アポフィスが地球大接近する機会を捉えて探査を行うRAMSES計画を、ESA・JAXA共同ミッションとして着実に進める。 地球防衛は、外交力に貢献する活動であるとともに、社会の興味も高く、将来の脅威に備えるという文脈だけでなく、「宇宙における人類」といった世界観の醸成につながるよう貢献する。
(E) 宇宙天気 太陽フレアやコロナ質量放出などの太陽活動によって引き起こされる宇宙空間の環境変動を指し、人工衛星、通信、GNSS PNT、航空運航、電力網などの社会インフラに影響を与える現象	近年、宇宙天気研究は予報精度の向上と社会実装を重視する段階へ進展している。米国や欧州では、太陽観測衛星、太陽風観測、数値シミュレーション、AI技術を組み合わせた予報システムの高度化が進められ、研究成果を運用に反映する「Research-to-Operations (R2O)」の取り組みが活発である。こうした動きの中で、実用面に重点を置く大型の宇宙天気ミッション(ESA Vigilや韓国L4など)が計画・開発されている。さらに、予報現場で得られた課題や利用者ニーズを研究へ還元する「Operations-to-Research (O2R)」も重視され、研究と運用が相互に発展する仕組みが構築されつつある。	日本では、情報通信研究機構(NICT)が現業機関として宇宙天気予報を担い、大学等と連携した研究体制を構築しているが、「日本人宇宙飛行士が月面に立つ」という未来を考えれば、より宇宙天気を意識すべきである。 宇宙天気は、太陽の活動に伴って変化する宇宙環境を観測・防ぐために予測する活動であり、太陽圏科学で蓄積されてきた、あるいは、これから獲得される知見を、科学成果の創出だけでなく、宇宙天気という異なる角度に対しても積極的に活用されるよう貢献する。

月・火星は、太陽系と地球型惑星の形成・進化、生命生存可能環境の成立条件を理解する上で重要な探査対象である。月面では、太陽系初期の記録の解明や、月面の特性を活かした天文観測が期待される。火星では、地球とは異なる環境変遷を明らかにし、生命が存在し得る環境の成立条件を探ることが重要である。

また、「日本人宇宙飛行士が月面に立つ」ことに加え、有人月面探査において日本が大きな貢献をすることが期待されている。宇宙科学の立場からは、「有人活動」「月面」という言葉は前面に出る場面が多い中、月と火星の探査を効果的に連携させて進めていくことが重要である。有人活動計画の前段階に、無人による小型計画での予備調査を位置付けることが、探査活動全体を意義高いものとする上で不可欠であることを強調したい。具体的な方針は、次項「月と火星の探査における国際宇宙探査計画との連携」に示す。

3. 月と火星の探査における国際宇宙探査計画との連携

月・火星探査は、宇宙科学の成果創出に加え、人類の活動領域の拡大、国際協力、産業競争力、人材育成及び国際的プレゼンスの向上に資する政策的意義を併せ持つ。本ロードマップにおいては、アルテミス計画等の国際枠組みや「日本の国際宇宙探査シナリオ案2025」を、その記載内容の成熟度に応じて選択的に参照し、科学目標、技術実証、搭載・輸送機会及びデータ利用を戦略的に具体化する。

月面探査では、月の形成・進化の解明と、月面の特性を活かした新たな天文観測を目指す。「月面3科学」、すなわち月面天文観測、月サンプルの選別・採取・分析及び月震観測を代表的な重点取組としつつ、対象をこれらに限定しない。キュレーション(試料保管・管理)を含む試料利用基盤、月面環境計測、現地分析、月面での試料取扱い、移動・電力・通信等の基盤技術を組み合わせる。SLIMの高精度着陸技術やLUPEX等の成果を活用し、有人と圧ローバーの将来利用も視野に、無人着陸機や国内外の搭載・輸送機会等を活用して段階的な実証と科学成果創出を進め、将来の有人活動や広域探査活動へ接続する。これらの活動により得られる科学データは、月の形成・進化や月面環境に関する学術的知見をもたらすとともに、月面探査機器の設計・運用、有人活動の安全性確保、月面インフラ設計及び国際的な標準化にも資する。

火星本星着陸探査では、火星の環境変遷を解明し、生命が存在し得る環境の成立条件を探る。この科学目標と惑星保護の両立に向け、MMXの火星圏往還・サンプルリターン技術を発展させつつ、月面探査で得るその場分析、環境計測、試料取扱い、着陸・移動等の知見を火星本星着陸探査に段階的に接続する。特に火星STEP 1は、火星表面への到達及び継続的な観測に必要な探査能力の獲得を図るため、宇宙戦略基金等による深宇宙輸送、火星着陸システム及び火星観測機器等の開発成果を活用するとともに、大学・産業界等の新たな主体の参画を得て、機動的に具体化する。複数の成立シナリオを準備し、成果創出を特定の輸送手段の成立のみに依存させず、深宇宙輸送能力の複数目的地への展開可能性を考慮する。

これらを通じ、月・火星探査をつなぐ科学的知見及び技術を蓄積するとともに、政策的意義と学術的意義を相補的に追求し、日本の強みを活かした国際貢献と科学成果の最大化を図る。

Ⅱ．今後の宇宙科学プロジェクトの推進方策

1. 宇宙科学プロジェクトの推進方策
2. 宇宙科学のミッションカテゴリ
3. 技術のフロントローディング
4. 共通基盤
5. 人材育成
6. 国際宇宙探査との連携

1. 宇宙科学プロジェクトの推進方策

総予算規模、基幹ロケットのアンカーテナンシー、国際協力の制約等の条件の下で、宇宙科学分野を取り巻く課題(①開発費増大、②JAXA内外の人材不足、③打上げ確保の困難さ、④基盤設備の維持・確保の困難さ)を踏まえ、宇宙科学成果の最大化と持続的な発展を得るため、下記重要項目に従い、宇宙科学コミュニティが責任を持って実行する。

なお、コスト超過等が発生した場合、ミッション継続の意義・価値を勘案し、宇宙理工学委員会の意見を踏まえつつ、推進、縮小、中止等をISAS/JAXA経営が判断する。

- 日本の活動が世界からの期待に応えることができるよう、また、リソース制約や将来への展望にも目を配りながら、戦略的に計画すること
- 社会へどのような形で還元できるのかを常に意識した計画とすること
 - ✓ 技術力向上を通じた産業振興への貢献
 - ✓ 外交力への貢献
 - ✓ 人材育成への貢献
- 国内企業の協力を得やすい形の計画とすること
 - ✓ 頻度を堅持した予見性の確保
 - ✓ 一品モノを要求する態度を改め、効率的な開発体制・方式を維持
 - ✓ 宇宙戦略基金の成果の活用
 - ✓ JAXA含む複数活動領域(地球観測等)における開発成果の活用
- 世界の宇宙科学に大きな一石を投じる成果や海外の有力計画の機会の獲得や将来プロジェクトの着実遂行(リスク管理)に向け、新規性の高い技術の開発を技術のフロントローディング活動を積極的に活用すること
- 国際協力は欧米とのパートナーシップだけでなく、アジア太平洋地域各国との親交を深めることも視野に入れること
- 人材不足の解決として、大気球・観測ロケットに加え、技術のフロントローディングで開発した技術の小規模な宇宙実証の機会も将来を担う人材の育成の場として積極的に活用すること
- 宇宙科学の継続的成果創出、次世代人材、産業育成・振興の共通基盤となる設備等(実験場)を、宇宙科学研究所が中核的な役割を担い、大学・研究機関・産業界との共用を促進すること

2. 宇宙科学のミッションカテゴリ

ミッションを、「戦略的中型計画」、「公募型小型計画」、「戦略的海外共同計画」、「小規模計画」の4つのカテゴリに整理して推進する

- **戦略的中型計画**は日本の宇宙科学ミッションのフラグシップである。ただし、海外の大型計画と比べれば規模が小さいことを認識し、正面から競い合うのではなく、創意工夫や挑戦によって新たな分野を開拓するなど、世界の宇宙科学に一石を投じる成果を追究する。戦略的中型計画が呼び水となって海外主導の国際大型計画が立ち上がることも期待する。挑戦する態度で臨むことを重視する。
- **公募型小型計画**は頻度を高めることで、たとえ各々のミッションの成果は抑制的であってもテンポよく実施することによってプログラム全体としての成果最大化を狙う。「凄く良い」よりも「ちょうど良い」を目指す。「ちょうど良い」装置によって、予想もしていなかった観測結果が得られて新たな学術が創出される可能性も考慮し、頻度維持を優先する。ミッション頻度の堅持と準備期間を長期化させないことを重視する。
- **戦略的海外共同計画**は大型の国際共同ミッションなどに日本の強みを活かして参画するものである。参画することで、科学成果創出に加え国内の観測技術の維持・向上や国内学術コミュニティの発展を戦略的に実現することを目指す。
- **小規模計画**は海外の観測ロケット・大気球やISSなどを利用し、比較的小規模の実験を行うものである。
- 従来、国内の観測ロケット・大気球を利用した実験が行われてきたが、これに加えて、積極的にライドシェア等の機会を活用した小規模な宇宙実証実験の拡充や小規模輸送系の飛翔実験も行うことで、短期間での開発による観測や技術実証を推進する。これにより、将来の宇宙科学におけるコア技術の開発を進めるとともに、挑戦的な中型計画を担う宇宙科学の中核人材を育成する。

■ 国際協力について

日本の宇宙科学・探査計画の実行において国際協力はほぼ必須なものである。深宇宙探査を実施する際は、NASA深宇宙受信局(DSN)の支援をもらっている。BepiColomboが基盤となってESAとの関係が長年にわたって進化し、RAMSESという共同ミッションを生み出すことに繋がっている。日本が主導する計画から欧米の観測機器への搭載機会を提供することを通じて「日本が進める宇宙科学・探査の形」への共感を獲得してきている。今後は、これら欧米とのパートナーシップに加え、アジア太平洋地域各国との親交を深めることを意識し、宇宙科学で面白いことを一緒にやる、宇宙科学での挑戦を共有するという視点で貢献することも考える。

2. 宇宙科学のミッションカテゴリ

カテゴリ	目標	実施方針	規模	打上げ頻度
戦略的に実施する中型計画 (海外主導ミッションへの中型計画規模での参加含む) ※基幹ロケット(H3クラス)での打上げを想定	世界第一級の成果創出を目指し、各分野のフラッグシップ的なミッションを日本がリーダーとして実施する。多様な形態の国際協力が前提。海外主導の大型計画と徒に競争するのではなく、先行的な挑戦的技術開発により将来の国際計画のプリカーサとなることや、国際大型計画への、より存在感ある参加も含む。	➤ JAXA/ISASの戦略的中型計画は、宇宙科学コミュニティと宇宙科学研究所による「戦略的」なミッションの立案と実施プランに則り行う。 ➤ <u>日本の宇宙科学の中核となるミッションであり、世界の宇宙科学に大きな一石を投じる計画を目指す</u>。学術上の問いに答え終止符を打つよりも新たな問いを打ち立てる計画を志向する。 ➤ ISAS所長の諮問に応じて審議・評価を行う宇宙理学・宇宙工学委員会によって設置される宇宙科学将来ビジョン提言グループ(VG)は、宇宙科学コミュニティ全体としての一本化した将来像をまとめた「宇宙科学の将来ビジョン」を作成し、宇宙理工学委員会に提言する。<u>宇宙理工学委員会はVGからの提言を受けて「宇宙科学の将来ビジョン」を決定</u>、戦略的にワーキンググループ(WG)によるミッションコンセプト創出を進め、一定の成熟度をもってISASに提案する。 ➤ <u>ISASはサイエンスの視点に限らない総合的な観点を踏まえた上でミッション候補を評価・選定</u>する。またISASは、戦略的にミッションの立案・立ち上げを行うに当たり、技術のフロントローディングを有効に活用し、戦略的中型計画の実現に資する開発研究をタイムリーかつ集中的に行う。 ➤ 昨今、民間主導の宇宙関連の技術開発が活発になっていることを鑑みて、民間主導技術の積極的な導入により、<u>科学＝産業の技術共用性、学術＝民間の協業性の強化を図る。同時に、戦略的中型計画の開発成果が将来の民間主導活動に活用されることも推奨</u>し、そのような視点をもって開発を推進する。	最大400億円程度/機 (注1:海外主導ミッションへの参加の場合に当たっては、JAXA主導ミッションにおける相当部分の経費を考慮した資金規模を原則とする(例:観測機器提供であればバス及び打上げ費等不要になるため、100～200億円程度)。	10年間に3回
主として公募により実施する小型計画 ※基幹ロケット(イプシロンS)での打上げを想定	地球周回軌道などからのサイエンスを、適正規模のミッションでタイムリーに実現する。それにより、将来の世界第一級の成果創出や、国際共同の大型計画への主導権をもった参画を目指す。	➤ 宇宙科学コミュニティの多様な分野からのミッション提案をベースとしつつ、宇宙科学コミュニティと宇宙科学研究所の対話を通して、ミッション選定やミッション内容の調整を図る。 ➤ 戦略的な技術獲得やイプシロンロケットの成長戦略とも整合するよう、小型計画の全体計画を検討し、コミュニティと共有する。 ➤ <u>ミッション内容決定に当たっては、他ミッションとの相乗効果、その先の戦略的中型計画や海外大型計画等への展開など、宇宙科学・探査プログラムへの貢献も期待</u>する。 ➤ 経済的なコストキャップなど、設定したリソース制約の遵守は小型計画のミッション頻度維持において死活的に重要であることを鑑み、個別ミッションに投ずるリソースの決定にあたっては、プログラムの頻度維持を重視する。 ➤ <u>新たな標準小型衛星バスシステムを採用することで開発を効率化し、目標打上げ頻度達成を目指す。この標準バスシステムを適用する科学ミッション範囲は、技術的合理性を念頭に一定の線引きを行うとともに、技術的に親和性のある民間主導の宇宙活動も適用範囲に含める。</u> ➤ 頻度良く経済的なミッションを実現する観点からも、信頼性・品質基準及びメーカーとの契約形態・方法について考え方を整理し、ミッション規模やミッション目的に応じた運用を行えるようにする。	最大180億円程度/機 (ECO公募は最大100億円程度/機)	10年間に5回

2. 宇宙科学のミッションカテゴリ

カテゴリ	目標	実施方針	規模	打上げ頻度
戦略的海外共同計画(海外主導ミッションに中型計画の規模を上回らない規模で参加することも必要に応じ検討)	日本のヘリテージを活用することによる海外ミッションへのパートナーとしての参加や国際宇宙探査の観測機器の搭載・利用機会等、多様な国際協力の機会を最大限に活用し成果創出の最大化を図る。	戦略的海外共同プロジェクトの立案・選定にあたっては、コミュニティと宇宙科学研究所の協力の下にこれを行う。	10億円程度/年 (注2:単年度10億円程度の規模を踏まえ、1回当たりの規模は最大50億円を基本とする)	—
小規模計画	国内の幅広い研究者に対し提案を公募し、海外の観測ロケット・大気球、国際宇宙ステーション(ISS)などの飛翔機会を利用するなどした計画を推進。	他の3つのカテゴリと相補的に他では実施できない飛翔機会を提供する仕組みとして小規模計画カテゴリは妥当である。小規模計画の性格をより明確に定義しつつ柔軟で多様なミッション機会を提供する。	数億円程度/年	—

これらのカテゴリの他、観測ロケット、大気球に加えて、ロケットの相乗り機会等を活用した宇宙実証を通じて技術実証を推進する。これらをシリーズとして展開し、将来の宇宙科学におけるコア技術の開発に加えて、宇宙機の作り方を革新的に効率化する活動も視野に進めるとともに、その宇宙実証により、戦略的中型計画を担う宇宙科学の中核的な人材を育成する。

2. 宇宙科学のミッションカテゴリ

【参考】公募小型計画：セミオーダ式標準バスの適用（新小型バス）

- 基幹ロケットのアンカーテナンシーとして、着実にイプシロンS搭載ができることを前提（打上げ能力に十分マージンを持った計画（軽量化））
- 科学ミッションの目的達成のため、結果的に一品モノのような傾向がつよくコスト・スケジュール増となる傾向にあったが、2030年代の科学ミッションからの適用を目指し、バス部分の効率化を図りメーカ負担解消、コスト削減、スケジュール短縮、軽量化（イプシロンS対応）を軸に刷新
- 現行の小型科学衛星バスは、SPRINT（小型科学衛星）シリーズ計画の1号機として2013年に打上げられた「ひさき（SPRINT-A）」からのもので、技術進歩の早い世の中の情勢も踏まえ技術革新すべきタイミングであり、デジタル化やAIの最新の技術も取り込んだ革新バス
- この標準バスシステムを適用する科学ミッション範囲は、技術的合理性を念頭に一定の線引きを行うとともに、技術的に親和性のある民間主導の宇宙活動は適用範囲に含める。具体的には、望遠鏡ミッションを念頭に置く
- 戦略中型計画規模のミッションとの共通化も可能な限り図り、科学ミッション開発全体の効率化も目指す
- 打上げが高頻度ではない科学ミッションだけではロケット・衛星両側面をアンカーテナンシーとして支えることは困難であるため、イプシロンS打上げを想定する科学ミッション以外への活用（汎用性）も視野に入れた効率的なバスであることが重要と認識。ALL-JAXAでの活用も視野にニーズを取り込むことも想定

新小型バス
（セミオーダ式標準バス）



適用

科学ミッション（公募小型将来計画）

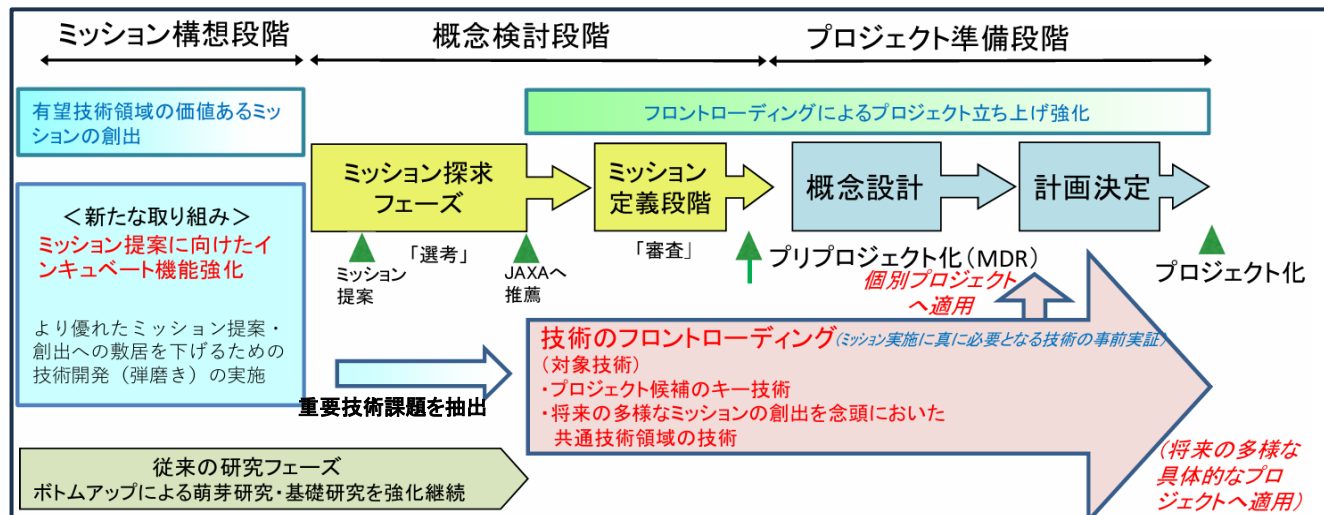


科学ミッション以外
地球観測衛星、商用衛星等

3. 技術のフロントローディング

直近のミッションの立ち上げに推進力を与えつつ、将来に向けた魅力的なミッションを創出する活動を両輪とし、重要な技術をピックアップし実施。ミッション固有の技術ではなく、科学ミッション共通技術としての開発を行うことで開発の効率化につながっている。2020年度から開始した本活動は、具体的な成果が創出されつつあり、リスク低減、技術成熟度の向上を補強できる観点から、科学ミッション立上げにおいて重要な活動としての位置づけ、今後、さらに積極的に活用をおこなう。

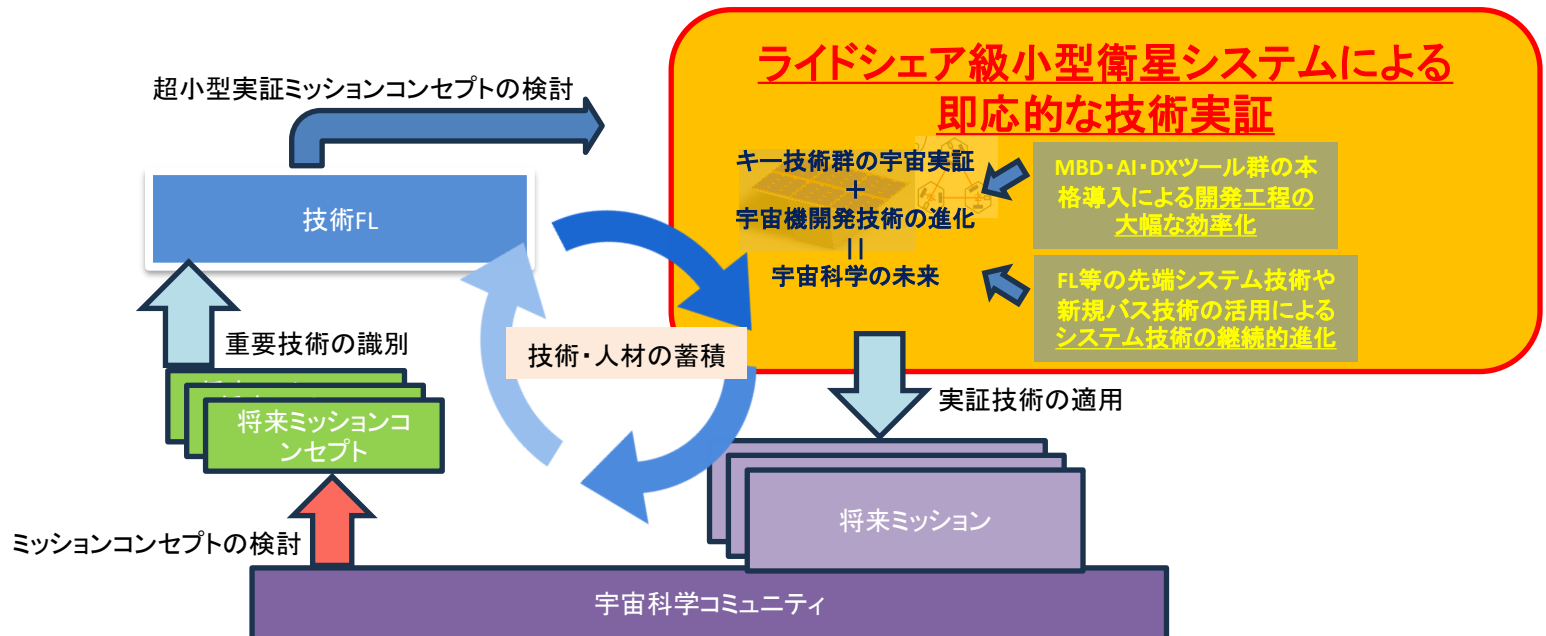
- ミッション創出機能強化(プロジェクト立ち上げ強化)として、従来の学術研究の一部であるボトムアップによる萌芽研究・基礎研究機能の強化に加えて、フロントローディングとして、プロジェクト候補のキー技術や多様なプロジェクトへの適用が可能な獲得すべき共通技術領域の技術の開発を推進する。
- 特に挑戦的なミッションを実現するためには、新規性の高い技術がキーとなる。リスク低減には、プロジェクト立ち上げ・国際ミッションへの参画前にその研究開発を、「技術のフロントローディング」として本格化的に実施し、技術成立の見通しを得る。
- 技術のフロントローディングにおける技術の一部は地上検証に加えて、技術成熟度(TRL)向上も目指し、宇宙実証を実施する。



3. 技術のフロントローディング

【参考】小規模宇宙実証実験：ライドシェア級小型衛星による技術実証について

- 本格的な宇宙ミッションへの適用に先んじての実証機会として従来から活用されてきた観測ロケットや大気球に加えて、実際の宇宙科学・探査ミッションに近い軌道上実証としてライドシェア級小型衛星の活用を目指す。
- 具体的には、技術のフロントローディングにて検討が進められた技術のうち、特に宇宙実証が有効な項目をクイックに宇宙実証する体制を確立する。当該技術を含んだ衛星システムを即応的に開発し、ライドシェアなどの機会が訪れたときにそれを逃さずに利用することとする。
- これが有効に機能するには衛星システムを短期・低リソースで実現することが重要。そのため、従来の常識に囚われずに新たな衛星開発手法を模索・試行・実現する場としても活用していく。
- これらの活動を経験することで、衛星開発に対するより深い洞察力を有する人材を輩出することが出来る。すなわち、この活動を通して、将来の宇宙科学におけるコア技術の開発を進めるとともに、挑戦的な中型計画を担う宇宙科学の中核人材を育成する。



4. 共通基盤

- 宇宙科学研究所の役割を「宇宙科学ミッションの持続的実行」と位置づけ、その役割に即した宇宙科学研究の共通基盤を再構築する
- 宇宙科学・探査を持続的に推進するためには、飛翔機会のみならず、試料のキュレーション(保管・管理)、超高真空・極低温試験、深宇宙航法、地上局運用、データアーカイブ等の研究基盤を維持・発展させることが重要である。特に、大規模、高度、または用途が限定されるなどの理由により、民間では整備・維持が困難な基盤については、JAXA/ISASが中核的役割を担い、大学・研究機関・産業界との共用を推進する。

共通基盤1:「目の前の宇宙科学ミッションの実行」

開発段階・運用段階の宇宙科学ミッションのための宇宙機開発に必要な各種試験設備や、宇宙機運用に必要な深宇宙通信局を含む地上設備を体系的に構築。構築にあたっては、下記の2つに大別し、①は民間での運用も視野に入れ、属人的にならない運用を目指し、②はインハウスでの運用により人材育成に資するものとする。

- ① 全JAXAとして利用でき、さらには民間も含めた日本の宇宙活動全般に供することが可能な戦略的中型計画、公募型小型計画向け
- ② 小型飛翔体向け(観測ロケット、大気球、宇宙実証等)

共通基盤2:「将来のブルーオーシャンに進出するための研究」

日本の宇宙科学が欧米の超大型ミッションに対して持続的に伍していくためには、ブルーオーシャンを開拓し続ける工学研究、測定技術開発が不可欠である。このような工学研究、測定技術開発を牽引する基盤を構築し、大学共同利用システムを活用して大学の研究者等との協働による研究開発を推進する。

- ① 研究室レベルでの研究開発を実証できるプラットフォームとしての、観測ロケット、大気球、宇宙実証等の小型飛翔体実験機会を通じて実際の飛翔環境で検証し、将来の宇宙科学ミッションへと発展させる研究基盤を整備する。地上での研究開発成果を宇宙で実証し、技術・観測手法・運用手法の有効性を確認することで、将来の小型計画や戦略的中型計画につながる新たなミッションを創出する。さらに、これらの活動を通じて、宇宙機システムを成立させる能力やプロジェクトマネジメント能力を備えた人材を育成し、日本の宇宙科学・探査を継続的に支える基盤とする。
- ② ブルーオーシャン開拓にふさわしい尖った能力を持つ試験設備群を構築し、大学共同利用施設設備の再構成を進める。これらの試験設備群は、全JAXAの開発研究または民間宇宙活動目的には過大な能力要求となることが多いことを踏まえ、学術界としての基盤運用とならざるを得ないと思料するが、その試験設備群の開発、運用、維持そのものが広く工学分野の研究開発、さらには民間転用の基礎となることを主張して実現を図る

5. 人材育成

宇宙科学研究所に必要な人材及び人材育成のあり方を通して、研究教育・プロジェクト実行・宇宙科学研究所の運営の各機能を持続的に発展させるための基本原則と運用の枠組みとして定めている「宇宙科学研究所人材育成基本方針」に沿って実行する

I : 「部分最適から全体最適へ」

宇宙研での活動には多様な人材が必要であるところ、宇宙研の人材全体を俯瞰し、採用時の職種等に関わらず有機的に連携しながら、人事制度やその運用の課題を明確にし、全体最適のための修正を行う。

II : 「宇宙科学・探査の将来を担う多様な若手人材育成の強化」

長期的な視点でDEI(多様性・公平性・包括性)を尊重しながら若手人材の育成が可能な環境を整備する。また、多様な若手研究人材が、自律的に将来のキャリアパスを見据え、宇宙研でのキャリア継続が選択可能な環境を整え、宇宙研固有の研究基盤と実践的教育環境の中で、宇宙科学ミッションの実行プロセスを理解した将来の宇宙科学ミッションを実現できる人材育成につながることを目指す。

III : 「宇宙研教育職としてのアイデンティティの確立」

宇宙科学ミッションの創出・実現を牽引するとともに、日本の宇宙開発・宇宙利用における課題解決に学術研究の専門家として関与し、その波及効果を宇宙科学分野に橋渡し役として貢献できる宇宙研ならではの教育職を育成する。

IV : 「一般職(技術系)の主体的な参加と育成機会の提供」

ミッションの実現に向けた検討・設計・実装等のプロセスに主体的に参画し、技術的判断や実務遂行を通じて組織としての成果創出に貢献できる人材の育成を図る。

V : 「一般職(事務系)の提案型人材への転換」

自律的に技術・事業に関する知見を高めることを通じて宇宙科学・探査を取り巻く状況を的確に把握し、自ら提案・推進するとともに、一連の研究活動を俯瞰的にマネジメントし、研究の活性化・円滑化を支える人材を育成する。

VI : 「任期制職員の適切かつ積極的な活用」

任期制職員の役割を明確化した上で、プロパー職員と相互補完・相乗しながら業務推進できる環境を整える。

VII : 「パートナーとの協働関係維持のための環境整備」

派遣労働者及び請負業者との適切な協働関係のもと、その専門性を最大限に活かせる環境を整えるとともに、適切な調達を継続的に実施できるようにする。

6. 国際宇宙探査との連携

国際宇宙探査は、国際協力の下で進められる有人探査及びそれに先行する無人探査であり、宇宙科学・探査とは目的や制度が異なる。一方、技術、データ、人材及び国際調整の面で密接に関係する。宇宙科学・探査プログラムは、従来のボトムアップによる独創的・挑戦的な科学ミッションを維持しつつ、国際宇宙探査と連携し、その搭載・輸送・実証機会を活用するとともに、有人と圧ローバー、測位・通信、電力等の機能や月面インフラを科学利用につなげることで、科学の観点からも成果の最大化を図る。

その際、科学コミュニティが計画立案の早期段階から参画し、取得すべきデータ、必要な観測機器、搭載・利用機会、国際協力の枠組み並びにデータ公開・利用方針を、関連施策と整合させて整理することが重要である。探査で得られた科学データ及び帰還試料は、国際的な取決めや適切な管理の下で、可能な範囲で科学コミュニティによる利用に供し、大学共同利用や大学等との連携を通じて、研究者、学生及び若手人材の宇宙科学・探査への継続的参加を促す。また、必要な地上検証・校正を行う環境、データ解析手法及び試料分析体制を整え、次の搭載・利用機会や国際共同計画へ円滑につなげる。国際宇宙探査における観測機器と月面インフラ等とのインターフェース、データの取扱い及び運用手順について科学利用要求を整理し、必要な国際調整を進め、得られた知見を将来のミッション立案、技術のフロントローディング、産学官連携及び人材育成に活用する。

さらに、民間企業や異分野研究者の参画を促し、非宇宙分野の技術も取り込みながら、宇宙科学の裾野を広げる。大学・産業界による技術開発・人材育成の取り組みや、宇宙戦略基金等による開発成果及び実証機会を活用し、国際宇宙探査に必要な能力の獲得と参加主体の拡大を図る。これにより、国際宇宙探査が提供する搭載・利用機会を科学成果の創出に活かすとともに、宇宙科学コミュニティの基盤を強化し、獲得した技術・人材を産業界や社会へ循環させ、日本の科学技術・宇宙産業基盤と国際的プレゼンスの向上に貢献する。

6. 国際宇宙探査との連携

【参考】国際宇宙探査及び月面インフラに対する宇宙科学からの期待

国際宇宙探査が提供する搭載・輸送機会を活用するとともに、有人与圧ローバー、電力、通信、測位、移動、機器運搬・展開等の機能や月面インフラを、月面科学の成果創出にも活用することを期待する。月面天文観測、月サンプルの選別・採取・分析、月震観測、環境計測等を、着陸点近傍から広域・多点・長期の活動へ段階的に発展させるため、科学コミュニティが計画立案の早期段階から参画し、観測地点、搭載機器、電力・通信・移動等の機能、運用条件及びデータ利用方針に関する科学利用要求を具体化する。また、無人探査と有人活動の特長を組み合わせ、月面固有の科学成果を創出するとともに、得られる科学的知見と高精度着陸、表面移動、環境計測、現地分析等の技術を、将来の火星本星着陸探査へ接続する。



月面天文台



月面での試料採取・
その場分析



月震計



SLIM



LUPEX

2020年代～： SLIM、LUPEX等

- ・ スラスタ
- ・ 逆噴射による軟着陸
- ・ 障害物回避を伴うピンポイント着陸

2030年代～： 月探査から火星本星着陸探査プログラムへ



共通軌道間輸送機
(OTV)

小型無人
ローバー



火星着陸技術



有人与圧
ローバー

将来の国際月輸送機会に向けた科学
ミッションの提案

月面固有の科学成果を創出し、その知見・
技術を将来の火星本星着陸探査へ接続

Ⅲ. 各分野の将来構想検討

1. 宇宙科学・探査の将来像
2. 中期計画(10年間)
3. 将来構想(10年間)の読み方
4. 宇宙理学分野の将来構想～宇宙史と生命の起源の解明～
5. 宇宙工学分野の将来構想～人類の活動領域の拡張～

1. 宇宙科学・探査の将来像

第I章では宇宙科学とは何であるのかを述べた。第II章では、日本の宇宙科学が持つツール群を概観した。第III章では、第I章で概説された目標に向かって第II章で紹介されたツールで進められる、日本の宇宙科学の将来構想を述べる。

「人類として取り組むべき宇宙科学への理解」は世界で進めていく課題である。そこにおいて、日本はサイズで勝負をすることはできない。より挑戦的な計画を成功させていってこそ、日本の世界における立ち位置は維持できる。日本としてのどういう強みを活かし、日本はどの部分にどのように貢献するのか、ということを常に意識する必要がある。これは(遣り甲斐は大きい)が)容易なことではなく、この活動を担う中核的人材を持続的に輩出する仕組みも備える必要がある。

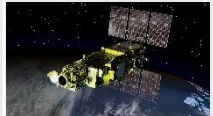
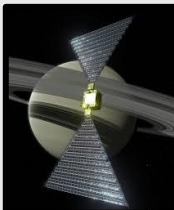
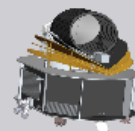
＜本ロードマップが示す具体的な将来構想検討をより深く理解するために＞

「人類として取り組むべき宇宙科学への理解」は世界で進めていく課題であるのに対し、日本としての強みを活かし、日本はどの部分にどのように貢献するのか、を読み取ることを推奨する。

- 宇宙基本計画工程表に示されている先10年を示す中期計画に示された各ミッションは「いつ、どういう計画を打上げる」だけでなく、各々の計画を繋げてとらえることで、今後10年間に於いて日本が世界の宇宙科学の進展にどう貢献するのかという戦略的な計画を理解することができる
- 現在の宇宙科学の潮流を踏まえると、10年後からの先は、従来の「宇宙物理学&太陽系科学探査」との枠組みが変化すると想定される。地球はなぜ生命惑星なのかという問題意識に対しては「近くのを詳細に観測してデータを獲得する」という要求に至り、「太陽に近い系外惑星の観測」と「太陽系内小天体から帰還させたサンプルの分析」という全く異なる手法からの成果を統合する視座が求められる世界となる。
- これは、宇宙物理学が“より遠くへ・より昔をみる”ために高感度化を進めたのに対し、系外惑星探査の登場により近傍天体の観測手法の多角化・高精度化により太陽系科学探査と繋がった宇宙理学としての関連性が再び重視されるからである。
- 宇宙工学においては“より遠くへ・より自在にいく”を標榜した技術開発を行うことで、上述の学問的視座の変化を先取りした技術体系を創り出していく。技術の具現化に当たっては「新しいやり方」と言えるものをいくつか提示し、業界とも連携し日本の宇宙活動に新展開をもたらすことを狙う。
- また、宇宙開発の裾野の広がりにより、「拡張された宇宙科学」「科学以外の価値観」といった宇宙科学計画は従来よりも広い領域からのテーマに密接に関連するようになってきている。新たにパートナーシップ含め連携を深めること、場合によっては、計画を実施していくうえでの大きな役割を有力研究機関に委任することも今後想定される。
- 月・火星探査では有人探査との協調は必須であり、小型無人探査が全体プログラムにおいて最も効果的である姿を探求していくべきである

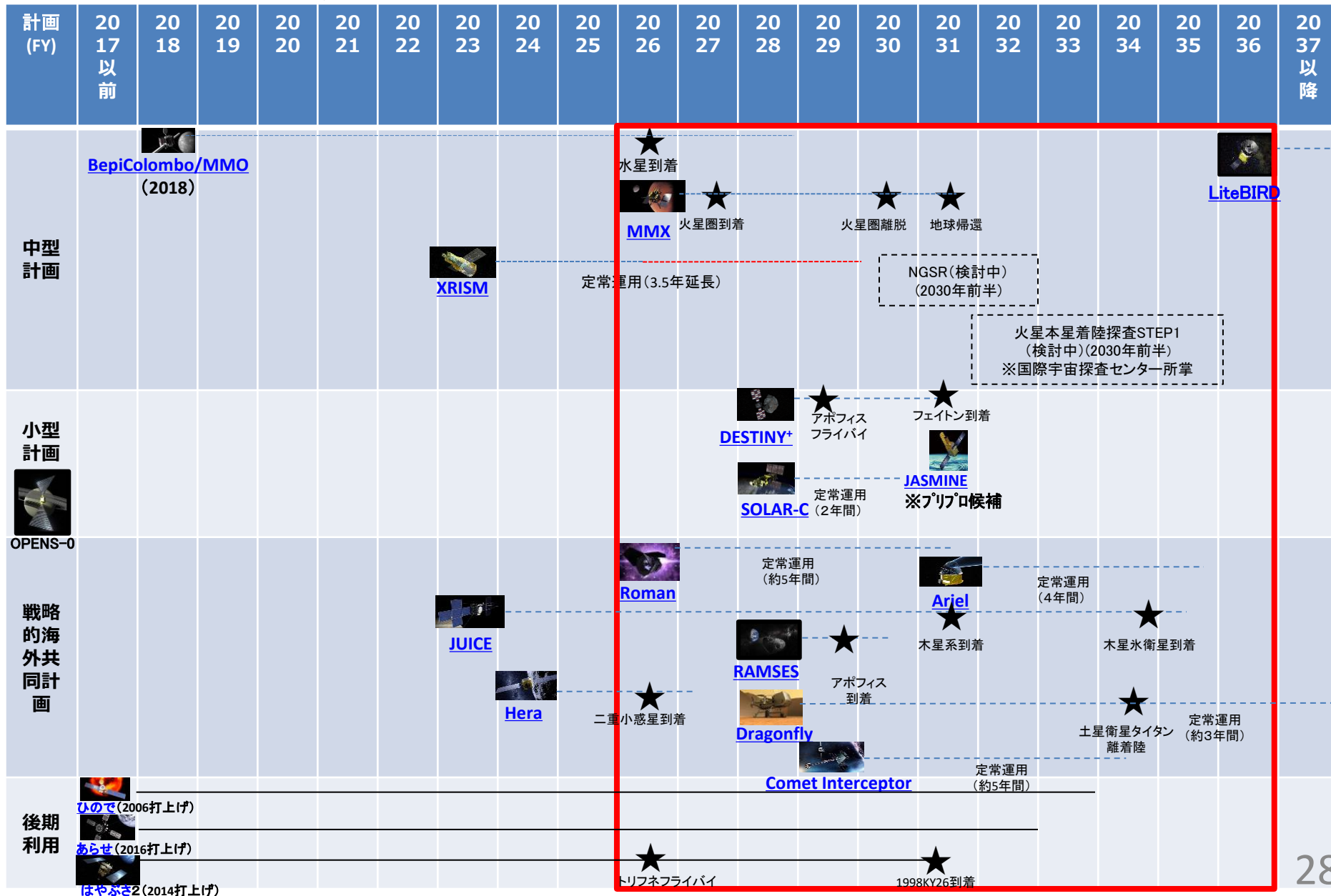
2. 宇宙科学・探査の中期計画(2026-2036年)

打上げが想定されているミッション

計画 (年度：FY)	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033 以降
戦略的に実施 する 中型計画	 火星衛星探査計画 MMX	 火星圏到着			 火星圏離脱	 地球帰還		 マイクロ波背景放射偏 光観測宇宙望遠鏡 LiteBIRD (FY2036)
主として公募に より実施する小 型計画			 高感度太陽紫外線分光観測衛星 SOLAR-C					
	 OPENS-0 (ECO & FAST)		 深宇宙探査技術実証機 DESTINY+			 赤外線位置天文観測衛星 JASMINE		
戦略的海外共 同計画	 Roman宇宙望遠鏡		 地球接近小惑星 アポフィス探査計画 RAMSES	 長周期彗星探査計画 Comet Interceptor				 系外惑星大気赤外線分光 サーベイ衛星計画 Ariel
			 土星衛星タイタン 離着陸探査計画 Dragonfly					

2. 宇宙科学・探査の中期計画(2026-2036年)

先10年に運用される想定の新探査ミッション群



3. 将来構想(10年間)の読み方

前ページで述べた日本宇宙科学透視図は、具体的なミッションを実行することで獲得される。そのミッション群全体を提示する前に、以下で概説する。

- 戦略中型では、「宇宙がどのようにして始まったのか」という魅力的な問いに迫るため、宇宙背景放射の偏光観測という難易度の高い観測を宇宙望遠鏡で実現させたい。実現するためには、高感度の検出器を冷却して低雑音の観測を実施する必要であり、欧州等と大型協力し、その後の発展も見据えて、この第一歩を踏み出すのがマイクロ波背景放射偏光観測宇宙望遠鏡(LiteBIRD)である。「(2)地球を生命惑星とならしめた初期条件を理解する」には、複数の小天体からのサンプル帰還が必要である。対象天体に効率的かつ柔軟性をもって探査するには、深宇宙輸送機(OTV)と対象天体(現地)で活躍する小型探査機の組み合わせが重要。この分野で世界をリードしてきた日本として、工学的新規性を導入し、生命惑星の理解という大きな課題の探求に太陽系探査から貢献するのが、次世代小天体サンプルリターン(NGSR)である。
- 公募小型計画では、ちょうどよいものをテンポよく実施するために、新しい共通衛星バスを導入する。この刷新した開発方法の最初の適用対象となるのが、赤外線による位置天文学的観測を行い天の川銀河の構造を解明する赤外線位置天文観測衛星(JASMINE)である。開発された新しいバスは宇宙望遠鏡バスとしてシリーズ的に活用し、宇宙望遠鏡計画を実行することを想定する。
- 「生命惑星」をキーワードとする将来の分野融合を見据え、宇宙からの観測が出遅れる系外惑星観測に関して海外計画に参加する機会も活用しつつ、国立天文台との連携を深める。さらに、2040年代に米国が主導する大型計画HWOに貢献する道筋をつける。
- 月・火星探査では、火星衛星フォボスからサンプルを帰還させるMMXの先に、「日本ならではの」の小型でスマート、高頻度で実施可能な火星本星着陸探査の実現を目指す。これは、「生命惑星」研究に貢献するだけでなく、そのように魅力的な火星本星着陸探査を先進国以外の多くの国にとって身近なもの(手の届くもの)とすることにも繋がる。
- 「地球防衛」「宇宙天気」という、宇宙科学の活動を従来の領域から拡張する活動にも取り組む。前者は小惑星探査をリードしてきた実績と2029年の小惑星アポフィスの地球大接近、後者は太陽圏科学での実績と日本人宇宙飛行士が月面に立つことを意識する。
- 月面活動では、月面天文観測、月サンプルの選別・採取・分析及び月震観測等の科学目標から、輸送、設置・展開、表面移動、電力・通信及び長期運用に必要な要求を具体化する。無人探査と有人圧ローバーを含む有人活動、多様な搭載・輸送機会を組み合わせながら、着陸点近傍から広域・多点・長期の活動へ段階的に発展させる。また、科学コミュニティが計画立案の早期段階から参画し、長期継続観測等に必要となる電力・通信等の月面インフラについて科学利用要求を具体化し、その機能を科学成果の創出に活用する。そこで得る科学的知見と高精度着陸、表面移動、環境計測、現地分析等の技術を火星本星探査へ接続する。
- 宇宙科学の持続的発展を意識し技術のフロントローディングはテーマを厳選しつつ着実に進める。また、それらの新技術を宇宙実証する機会を獲得することも目指す。獲得した際には、宇宙科学を進めていく「新しいやり方」も試行し、宇宙科学の新展開を担っていく人材育成の機会としても活用する。そこから、日本の宇宙活動に新しい動きを生み出すことも狙う。
- 宇宙輸送工学分野の活動は、宇宙科学のみならず宇宙活動全体への新たな展開を意識し、日本独自の革新的な大気アシスト技術を獲得して、早期かつ段階的に民間に技術移転する。JAXA実験場との強い連携のもとに活動を進め、実験現場での経験を通じて、将来の日本の輸送系開発を支える人材を育成することも意識する。

3. 将来構想(10年間)の読み方

- この先10年の将来構想は、さらにその先10年に取り組むべき科学的課題を踏まえて語られなければならない。そうした科学的課題が「4. 宇宙理学分野の将来構想」「5. 宇宙工学分野の将来構想」に俯瞰されている。
- 宇宙理学においては、人類として取り組むべき宇宙科学を「宇宙史の解明」(過去から現在への時間にそった軸)と「生命の起源の解明」(現在における多様性ということで時間軸には直交)、の2つの軸、そして宇宙科学領域の拡張と整理することができる。
- この先10年の間は、宇宙史の解明と生命の起源の解明を目指し、地球低高度からジオスペースにおける多様な軌道、深宇宙探査に至るまで広範な領域に衛星・探査機を送ることで実施する
- 宇宙史の解明においては、宇宙開闢から天体誕生まで、多様な天体形成と進化、火星からの情報を含む太陽系の形成の把握に、生命の起源の解明においては、太陽圏システム科学の理解、系外惑星・太陽系と多角的な生命可能性の探査に、宇宙科学領域の拡張においては、地球的課題、あるいはそれを包含する基礎科学の両方向、を重点に置いて実施する
- さらに宇宙工学においては、これらを実現する技術を「輸送」「探査」「観測」の分野で開発を進めるとともに、さらに先を見据え、「全く新しい宇宙のやり方」とでも言えるような技術開発の芽出しを行い、宇宙科学で探求するテーマを拡大する際の敷居を下げ、もって宇宙活動全般を先導する



人類として取り組むべき宇宙科学(概念図)

3. 将来構想(10年間)の読み方

【宇宙史の解明】 謎(A)宇宙は現在の多様性をどのようにして獲得したのか

	目的	実現に向けた10年の計画	他課題との関連
(A)-1 宇宙開闢から 天体誕生まで	宇宙の始まりで何が起き（インフレーション等）、どのように時空が進化し（加速膨張等）、さらになぜ銀河や恒星などの天体の誕生に至ったのか（晴れ上がり・暗黒時代・初代星など）を、精密な宇宙観測に基づき明らかにする	宇宙の晴れ上がり以前に挑む精密観測の実現を図り、精密宇宙観測技術として放射冷却技術と機械式冷凍機技術など様々な先進的技術を用い、またL2での大型ミッションを実現する。 ■ 課題解決に向けた戦略的中型計画として、宇宙背景放射(CMB)の偏光を全天で精密に観測し、インフレーションの痕跡を探る LiteBIRD	✓ 宇宙の始まりの理解は、物質・時空の根源や標準理論をこえる基礎物理学の理解を深化させる。 ✓ 宇宙背景放射を精密かつ全天を観測することで、前景放射としての現在の宇宙における大構造、天の川銀河中の星間物質や磁場を同時に観測する ✓ 大規模かつ精密な全天データを構築することにより、データ科学としての宇宙科学データ利用を促進する。
(A)-2 多様な天体形成と進化	宇宙大規模構造や様々な銀河、我々の住む天の川銀河や恒星・惑星が、なぜどのように形成されたのか、そしてこれらの天体でどのように元素が作られ宇宙を循環しているのかを、望遠鏡による宇宙観測と探査によるその場観測を組み合わせて明らかにする	宇宙望遠鏡の継続的な打ち上げと、国際大型ミッションへの参画によって精密宇宙観測の経験を積む ■ 極低温検出器によりX線分光能力を高めた先鋭的な戦略的中型計画 XRISM ■ 戦略的国際協力による欧米の大型ミッションへの参画で、銀河サーベイや系外惑星の大気観測を行う。 Roman, Ariel ■ 継続的な小型望遠鏡衛星の嚆矢として、精密な位置測定により天の川銀河の構造や系外惑星検出を行う JASMINE	✓ 銀河形成史や元素の化学進化を知ることで、宇宙における天体形成総体としての理解を深め、太陽系形成や生命を育む環境を理解する ✓ 波長分解能をあげる、空間分解能をあげる、などの技術的革新により高精度観測技術を磨く。 ✓ 小型計画による望遠鏡衛星、海外大型ミッションへの参画など、様々なプログラムを組み合わせる。
(A)-3 太陽系の形成	銀河系における物質進化の中で、前太陽系時代と太陽系の形成を結びつける物質進化を実証的に明らかにする	彗星を探査対象とするNGSRによって前太陽系時代の物質を直接採取し、前世代の恒星の終焉から太陽系を形成する星の誕生へと至る物質進化を途切れなく結びつけることが期待できる。 ■ 中核的役割が期待されるミッション NGSR	✓ NGSRがE型/D型小天体からのサンプルを得ることができると、地球型惑星の主要な材料物質を汚染のない形で得ることや、外惑星を形成した材料物質をはじめて明らかにすることが期待できる

3. 将来構想(10年間)の読み方

【生命の起源の解明】 謎(B)地球を生命惑星とするプロセスはどのようなものであったのか

	目的	実現に向けた10年の計画	他課題との関連
(B)-1 太陽系形成後の物質進化(生命生存環境の形成を理解する上での鍵)	太陽系の形成から惑星多様性の形成に至る過程の理解を目指す 長期的な目標: 探査によって得られる情報を、赤外宇宙望遠鏡計画、地上大型電波干渉計により得られる、星形成領域や原始惑星系円盤における物質分布の観測と比較することで、太陽系システムの物質進化を恒星惑星系システムの普遍的文脈に位置づける	太陽系に残る始原的天体に直接アクセスして、天体近傍からの直接観測を行うことや生命を育み得る恒星系誕生の理解に不可欠な物的証拠をサンプルリターンによって獲得することにより実現する。 ■ 小天体進化の比較研究を大きく進展させるミッション はやぶさ2拡張ミッション、DESTINY⁺、MMX、Comet Interceptor(ESA)、RAMSES(ESA) ■ 中核的役割が期待されるミッション NGSR	✓ NGSRなどの始原天体探査によって取得されるデータとそのデータを用いた始原天体の特性把握は、地球近傍に飛来する小天体に関して取得するデータの解釈に大きく貢献することになり、逆にRAMSESなどのプラネタリーディフェンスで取得されるデータと得られる知見は、始原天体に関する科学的知識の蓄積に大きく寄与することになる
(B)-2 現在生命が存在する地球を含む惑星システムの理解と予測(生命生存環境の持続性を理解する上での鍵)	太陽圏システムにおける惑星の形成・進化と、太陽の変動とそれが惑星圏に及ぼす影響の理解を目指す 長期的な目標: 恒星圏システムにおいて普遍的な中心恒星と惑星の形成・進化と中心恒星の変動が惑星圏に及ぼす影響の理解を進めることで、宇宙における生命生存可能システムの普遍的理解を目指す	異なる軌道半径や質量をもつ天体を対象として、地球型惑星の形成、プラズマ・大気環境、表層進化の比較を進めると共に、内部太陽圏における、中心恒星としての太陽の変動やそれが惑星磁気圏に及ぼす影響の理解を促進する。 ■ 生命生存環境の持続性の理解に向けて惑星の比較を実現するミッション JUICE(ESA)、MMX、Dragonfly(NASA)、OPENS-0、BepiColombo(ESA)/Mio、火星本星着陸探査等 ■ 多点同時観測により太陽の変動や惑星磁気圏と太陽風・惑星間空間磁場との相互作用の理解を進めるミッション SOLAR-C、MMX、BepiColombo(ESA)/Mio、あらせ、ひので	✓ SOLAR-CやMMX、BepiColombo /Mioなどによるデータは、ジオスペースにおける宇宙天気のみならず、月面や火星本星における宇宙天気予報、更には、火星以遠の外側太陽系領域における宇宙天気に必須となる観測データになり得る ✓ 月面科学及び月面環境・資源調査で得られる知見と、着陸・移動・環境計測・現地分析等の技術を、国際宇宙探査の機会も活用しながら火星本星着陸探査へ段階的に接続する。これにより、地球・月・火星の比較から、地球型惑星の形成、環境変遷及び生命生存可能環境の成立条件の理解を深める

3. 将来構想(10年間)の読み方

【生命の起源の解明】 謎(C)地球以外の宇宙にも生命はあるのか			
	目的	実現に向けた10年の計画	他課題との関連
(C)-1 宇宙における生命 探査	系外惑星、火星、氷衛星、外縁天体、恒星間天体などを対象として、生命の痕跡および生命生存可能環境を探索し、宇宙における生命の存在可能性を明らかにする	地球型惑星の存在量や探査可能な惑星の発見にむけ観測を進展させると同時に、系外惑星スペクトルを用いた大気探査法を確立し生命居住可能な系外惑星の直接観測を行う 大型計画への参画を目指し検討を進める 小型望遠鏡衛星(JASMINE)、技術フロントローディング、HWO	✓ 太陽系の形成の理解の進展と密接に関連すると同時に、高精度な観測を可能とする大型計画への参画は、同時に多様な天体の観測をもたらす

3. 将来構想(10年間)の読み方

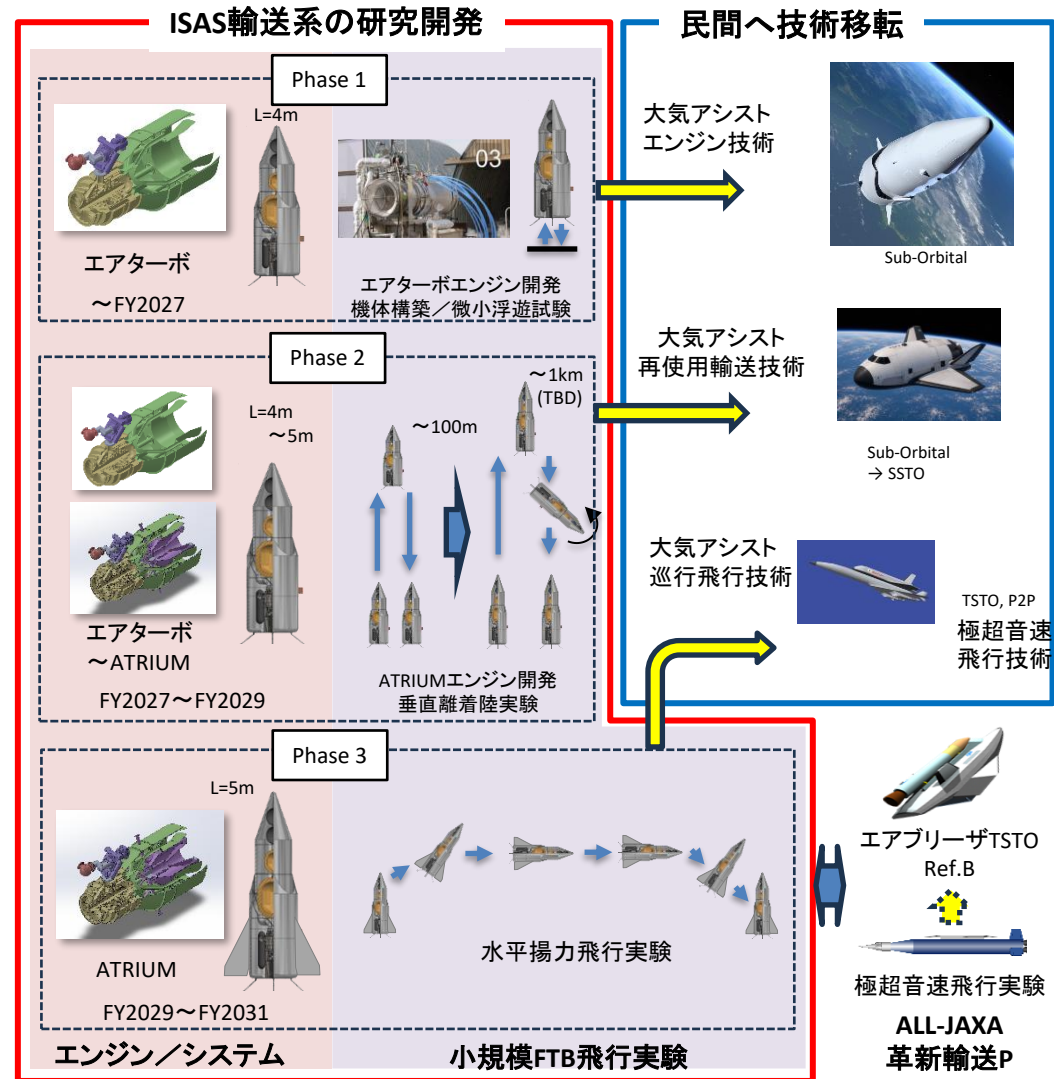
宇宙工学：宇宙活動の未来を見据えた工学技術の芽出し、宇宙科学を先導する技術の創出

	目的	実現に向けた10年の計画	他課題との関連
輸送	地上から太陽系内までを自在にアクセス可能な軌道間輸送ネットワークの実現に向け、先進宇宙輸送技術を実証的に社会へ示すべく、大気アシスト技術や共用OTVにより宇宙輸送の革新を図る	・機械環境試験なしで地上から宇宙に行ける輸送手段の実現に向けた研究とその小型フライト実験機(CRAFT)を使用した技術実証 ・共用OTVを活用したミッションの継続的实施を元に、より持続的・効率的な軌道間輸送の仕組みの追究 ・地球・火星といった大気を有する天体の表面への到達を効率化するEDL&R技術や探査プローブの高機動化技術の実現	✓ 探査ミッションの高頻度化・低コスト化を実現し、宇宙活動全体のアーキテクチャ革新に貢献 ✓ 将来の宇宙科学探査の基盤となるとともに、宇宙輸送技術の社会実装シーズを提供する
探査	太陽系遠方領域で自在な現地探査を実現し、人類の活動領域を拡張する。日本独自の探査技術を発展させ、外惑星領域を含む新たな探査を切り拓く。	・輸送と探査の機能分担に革新をもたらす探査機アーキテクチャ実証(NGSR) ・高度な自律性・複数機協調探査技術の獲得(NGSR) ・遠距離探査技術の実証(OPENS-0, NGSR) ・プラネタリディフェンスにも資する小天体接近・着陸・サンプルリターン技術の継承・発展(MMX, NGSR, DESTINY⁺, Comet Interceptor)	✓ 外惑星探査、小天体探査、プラネタリディフェンスに貢献 ✓ 月・火星探査活動(国際宇宙探査)への接続をする ✓ 産業界との連携による技術基盤の持続化にも寄与
観測	より鮮明かつ遠方の宇宙を観測するための観測システムを実現し、人類の観測領域を時間的・空間的に拡張する	・極低温観測技術の高度化(LiteBIRD, JASMINE) ・高精度観測を実現する衛星システム技術(全てのミッション) ・仮想的に大口径望遠鏡を実現するための超精密編隊飛行技術の実証(SILVIA) ・低リソースでの衛星開発を実現するバス技術の実現・適用(新小型バス(JASMINE, HiZ-GUNDAM, LOPYUTA), 小型宇宙実証実験)	✓ 初期宇宙・系外惑星・重力波等の先端観測を工学技術で支援し、大型国際共同ミッションへの参画基盤を形成する ✓ 低リソースでの衛星開発を実現するためのバス技術は、地球観測や民間宇宙産業への波及も期待される

3. 将来構想(10年間)の読み方

【参考】新たな輸送系研究:大気アシスト再使用ロケット (CRAFT) について

- ジェットエンジンとロケットエンジンを複合した新たなエンジンシステム (ATRIUM)を核とした新たな輸送システムをフライト実証しつつ研究する
- 高性能で、かつ、乗り心地がよい輸送系の実現を企図している。最終的には、「特別な訓練なしで宇宙旅行する」、「振動耐性を気にせず衛星開発する」、世界の創出を目指す。
- JAXAや大学コミュニティにて実証した技術をベンチャー企業などの民間に技術移転するサイクルを、早期に、かつ、段階的に回すことを目指す
- JAXAにて実証する機体の規模は小型に抑えることで迅速な実証を目指す。大型化などは、将来動向によっては技術移転後の民間企業主導での実現も視野に入れる。
- この活動をJAXA実験場と研究組織との強い連携の下に推進し、実験現場での経験を通じて、将来の日本の輸送系開発を支える人材を育成する



CRAFT: Compact Reusable Air-assist Flight Test

ATRIUM: Air Turbo Rocket for Innovative Unmanned Mission engine

4. 宇宙理学分野の将来構想 ～宇宙史と生命の起源の解明～

本セクションは、20年後以降までを見据えて、宇宙理学分野の将来ビジョン、日本のとるべき戦略、今後10年程度の目標を、宇宙理学コミュニティが取りまとめたものであり、Ⅲ.3.「今後10年の将来構想」取りまとめの源泉である。

4. 宇宙理学分野の将来構想

■ 分野全体を俯瞰する将来ビジョン

1. 宇宙史の解明

宇宙は現在の多様性をどのように獲得したのか、宇宙開闢(かいびやく)から銀河・星・惑星系の形成まで俯瞰して明らかにする

2. 生命の起源の解明

生命を育む太陽系・地球・環境はどのように成立したのか、系外惑星に生命の可能性はあるのかを明らかにする

1. 宇宙史の解明

- **宇宙開闢から天体誕生まで**: 宇宙の始まりで何が起き(インフレーション等)、どのように時空が進化し(加速膨張等)、さらになぜ銀河や恒星などの天体の誕生に至ったのか(晴れ上がり・暗黒時代・初代星など)を、精密な宇宙観測に基づき明らかにする
- **多様な天体形成と進化**: 宇宙大規模構造や様々な銀河、我々の住む天の川銀河や恒星・惑星が、なぜどのように形成されたのか、そしてこれらの天体でどのように元素が作られ宇宙を循環しているのかを、望遠鏡による宇宙観測と探査によるその場観測を組み合わせ明らかにする
- **太陽系形成**: 太陽系小天体・彗星・月・火星・他の惑星を対象に、探査によるその場観測やサンプルリターンおよび望遠鏡リモート観測を行い、その過程で得た物証(岩石・鉱物・氷・有機分子・元素組成・同位体比等)に基づいて、その形成過程を明らかにするとともに、太陽系における惑星材料物質の進化・移動過程を探る。さらに太陽系形成過程を一般の系外惑星の形成へと発展させ、宇宙史から生命の起源の解明へと橋渡しを行う。

4. 宇宙理学分野の将来構想

2. 生命の起源の解明

- **宇宙における生命の存在条件**: 系外惑星系や太陽系の知見を融合させ、生命を宿す惑星および生命生存可能環境の形成と持続性を理解し、太陽系における生命の材料物質(有機物)の進化・移動過程を解明する
- **宇宙における生命環境の理解**: 宇宙生命環境の理解のために、太陽および地球を恒星-系外惑星系の参照モデルとして観測する。また、太陽磁気活動の起源を解明し、太陽圏へのエネルギー・物質輸送(太陽風・高エネルギー粒子)を定量化し、プラズマを介した惑星大気・電磁気圏・表層への影響を明らかにすることで、太陽系における地球の生命環境を理解する
- **宇宙における生命探査**: 系外惑星、火星、氷衛星、外縁天体、恒星間天体などを対象として、生命の痕跡および生命生存可能環境を探査し、宇宙における生命の存在可能性を明らかにする

3. 宇宙史・生命の起源の解明を通じた宇宙科学領域の拡張

- **地球的課題への挑戦**: 宇宙における生命環境の理解を通じて、宇宙科学を地球的課題の解決へと展開する。宇宙科学を、プラネタリーディフェンス・宇宙天気研究/予報・宇宙資源探査へ展開するとともに、国際宇宙探査による月や火星の搭載・輸送・観測機会を科学成果の創出に活用し、人類の活動圏の拡大と宇宙科学の発展を相補的に進める
- **物理学諸問題の解決への貢献**: 宇宙史の理解を通じて、物質・時空の根源(暗黒物質、暗黒エネルギー)、標準模型を超える物理(インフレーション)、相対論の検証(ブラックホール、重力波、重力計測)、極限状態の物理学(磁気リコネクションやオーロラ、粒子加速、分子形成、極限量子実験)に対する知見を与え、基礎物理学の発展へ貢献する
- **宇宙を実験場とする基礎科学**: 宇宙空間という地上では実現できない環境を活用し、プラズマと波動、中性粒子、超高真空、低擾乱・微小重力実験、上層大気フロンティア探査、宇宙空間での生命活動などを通じて、新たな科学的知見を創出する

4. 宇宙理学分野の将来構想

■日本が採るべき戦略※

- 持続的なミッション体系の構築**: 適時的かつ頻度を維持した小型計画と先鋭的な科学目的を持つ中型計画を戦略的に組み合わせ、宇宙史のキーイベントまたは生命の起源に迫る手がかりを探索・解明し、将来的な新ミッションの創出や国際的なフラグシップ計画の根幹となるような成果創出を行う
 - キーイベントの例: 宇宙背景放射Bモード偏光、太陽系形成の初期条件、宇宙暗黒時代、銀河・銀河団形成と進化、初代星・コンパクト星連星・恒星の誕生と進化、恒星間天体、赤外線背景放射超過、原始ブラックホール、未発見のイベントなど
 - 手掛かりの例: 地球型惑星の統計、生命居住可能な系外惑星、系外惑星・地球外天体・リターンサンプルからの大気成分・バイオマーカー物質、生命の発生条件(水、エネルギー、有機物)、太陽系始原物質など
- 日本の強みを活かした重点科学戦略**: 望遠鏡観測、太陽系探査において、日本が国際的優位性を有する科学をさらに大きく発展させる
 - 宇宙望遠鏡観測では、日本の独自性を活かした小型望遠鏡観測衛星を継続的に打ち上げ、独自の科学成果の創出をめざしつつ、日本独自の技術を活かした観測機器の実証や実績の積み上げを系統的に行い、中型計画や存在感ある国際計画参加に繋げる。戦略的な長期的開発(大気球・ロケット・小型衛星・技術フロントローディング・技術獲得に繋がる国際計画への小規模参加など)を行い、先鋭的な科学目的と高い実現性を両立した中型ミッションを打上げる
 - 太陽系探査では、はやぶさ・はやぶさ2で培った世界的優位性を発展させ、サンプルリターンとその場観測を相補的に推進するとともに、小天体、月、火星、外惑星衛星などを対象とした独自の探査体系を構築する。また、太陽や惑星の大気・プラズマ環境の理解を深化させるため、日本が世界を先導してきた観測技術を発展させ、衛星・探査機や大気球・ロケット等の多様な飛翔機会により、「その場」プラズマ直接観測およびリモートセンシング観測を推進する。相補的な役割として、多様な小惑星や太陽系物質を探る小型ミッションを戦略的に展開する
- 国際大型計画への主体的参画**: 系外惑星における生命存在可能性の解明、原始重力波の直接観測、宇宙構造形成の起源、月・火星・外惑星探査など、世界が協力して取り組むべき根源的科学課題については、日本の科学的・技術的強みを活かして構想段階から主体的に参画し、存在感ある役割を担う。
- 将来を見据えた技術の研究開発**: 日本の持つ国際的優位性を保つ技術を強化するとともに、特にこれからの科学で重要となる以下の技術開発を強化する
 - 宇宙環境を利用した超精密観測技術: 精密光学技術、高精度指向制御、月面天文台、量子デバイス、AI、データ科学等
 - 宇宙でしかできない計測技術: その場観測技術、Transition Edge Sensor、赤外・紫外・X線・ガンマ線検出器
 - 宇宙工学分野と連携した技術: 極低温冷却技術、フォーメーションフライト、展開構造・擾乱抑制技術、大容量通信技術、外惑星往還、惑星保護
 また、将来的に重要となる技術は予測が難しいことから、萌芽的技術にリスクをとってチャレンジする枠組みの構築に向けた検討を進める

4. 宇宙理学分野の将来構想

■ 2040年代を視野に入れた目標※

2040年代には天文学・太陽系科学の深化が進み、宇宙ならではの精密観測や地球大気に妨げられない環境での電磁波観測の重要性が現在よりさらに増すと考えられる。2040年代には、2030年代に発見した宇宙史上のキーイベントや生命の起源の手がかりを軸に宇宙史と生命の起源の解明を行う

- 初期宇宙と天体の形成進化：**2030年代に宇宙晴れ上がり前の情報Bモード偏光・背景重力波などを捉え、2040年代にはこれを主軸とした初期宇宙観測を開花させ、宇宙開闢を司る重力・素粒子を理解する。日本の望遠鏡衛星がこれまで拓いた宇宙進化史をさらに拡張し、宇宙の構造進化を司るダークマター、未来を司るダークエネルギーの正体の解明、さらに我々の住む天の川銀河の形成史の解明を目指す
- 太陽系形成と生命存在条件の解明：**生命存在可能環境の形成・進化を解明するため、2030年代までに火星衛星や小惑星からのサンプルリターンを実現し、外惑星圏や彗星、恒星間天体の探査への道筋をつけ、同時に、月面科学、資源・環境調査および火星への段階的な先行探査などを進める。2030年代後半以降は、国際宇宙探査とも連携し、月面で得た科学的知見と着陸・移動・現地分析等の技術を火星着陸・気候・水環境探査へ接続する
- 宇宙の生命環境の理解：**2030年代に蓄積された太陽圏システム科学の知見を発展させ、2040年代にはリモート観測・「その場」観測・多点同時観測等を組み合わせ、太陽圏を一つのシステムとして捉え、太陽、惑星圏(磁気圏・電離圏・大気圏など)、衛星系、惑星間空間などからなる各サブシステムとその変動、およびそれらの相互作用を解明することで、太陽圏システムにおける物質・エネルギー循環を明らかにし、生命生存環境の持続性を理解する
- 地球外生命探査：**2030年代に地球型惑星の存在量や探査可能な惑星の発見、系外惑星スペクトルを用いた大気探査法を確立し、2040年代には国際ミッションに参加し、地球近傍の惑星系の生命存在可能性を探る。また衛星の内部海といった太陽系内の地球外生命の可能性を探査する

持続的な宇宙科学の発展には、現在予想できる方向性のみならず、未知の可能性を切り拓くことが重要である。日本の優位性を活かした新機軸の観測・探査ミッションや工学・太陽系・天文の分野間連携による独自のミッションを世界に先駆けて実行できる環境を維持・発展させる

2030年代の継続的なミッション実施、人材育成、基盤技術への投資を通じて、2040年代に実施される全人類的な科学課題(太陽系外惑星の生命可能性の探査や重力波干渉計など)を目的とした大型国際協力計画に、重要な役割を担う形での参加を目指す

4. 宇宙理学分野の将来構想

■ 今後10年程度の目標※

日本が採るべき戦略と長期的目標に沿って、今後10年程度の期間の具体的な目標を以下のように設定し、実現する。

- 国際ミッションへの参加を通じて宇宙構造・天体形成や系外惑星統計・大気観測を行う精密宇宙観測の経験を積む
→ ROMAN、ARIEL、PRIMA、BHEX
- 宇宙望遠鏡観測衛星を継続的に打ち上げ、宇宙での元素循環、天の川銀河の形成・系外惑星・太陽系惑星を探ることで生命を宿す現在の環境がいかに作られたかに迫る
→ XRISM、JASMINE、LAPYUTA、HiZ-GUNDAM、GREX-PLUS
- 晴れ上がり前の宇宙の痕跡を探り宇宙開闢の謎に迫る
→ LiteBIRD、SILVIA
- コロナグラフや紫外線装置の開発を行い、系外惑星での生命探査を行う国際大型ミッションHWOへの構想段階からの参加を目指す
→ HWO
- 始原天体探査において世界をリードしつつ、積極的に国際共同計画にも参加する。
→ MMX、DESTINY⁺ / RAMSES、Hera、Comet Interceptor、NGSR
- 国際宇宙探査と連携し、月面3科学、月面環境・資源調査及び試料利用を段階的に進めるとともに、月面探査で得る着陸・移動・現地分析等の知見を火星表面探査へ接続する。
→ LUPEX、UZUME、月面3科学に係る取組、火星本星着陸探査STEP 1を含む段階的火星本星探査(含MACO)
- 日本が強みをもつ技術を活かした木星・土星衛星探査を実施する。
→ JUICE、Dragonfly、氷衛星プリューム探査
- 国際的優位性を活かした太陽・地球・小天体プラズマ環境探査を実施する。
→ ひので、あらせ、BepiColombo、FACTORS、GEO-X、JUICE、Comet Interceptor
- イプシロン規模で太陽の磁気プラズマ活動の本質を探る。
→ SOLAR-C、PhoENiX

上記の他、宇宙史・生命の起源の解明にむけた更なる将来計画の検討を進める。

5. 宇宙工学分野の将来構想 ～人類の活動領域の拡張～

本セクションは、20年後以降までを見据えて宇宙工学分野の将来ビジョン、日本のとるべき戦略、今後10年程度の目標を、宇宙工学コミュニティが取りまとめたものであり、Ⅲ.3.「今後10年の将来構想」取りまとめの源泉である。

5. 宇宙工学分野の将来構想

■ 分野全体を俯瞰する将来ビジョン

- 科学的・技術的に挑戦的な宇宙科学・探査ミッションの継続的な実行を通じて、太陽系、あるいは、それを超えた宇宙空間を、より広く、より自在に、そして、より高精度に航行する**輸送・探査**システムが実現し、より高精度でより広範囲な**観測**システムが実現する。これにより、人類の活動空間および科学領域を拡張・創出する。
- また、それらのシステムの実現が、プラネタリ・ディフェンスなど喫緊の地球的課題も含め、人類的課題を解決する嚆矢とする。
- そして、これらの活動により、今後の宇宙活動全体のキーとなる技術が創出されて社会実装されるとともに、宇宙活動を牽引できる人材を育成する。

具体的には、上記の「**輸送**」、「**探査**」、「**観測**」の3つのシステムが次のように発展していく。

「輸送」: 地上から太陽系内のより広い範囲を自在に航行できる、従来にない宇宙往還・軌道間輸送ネットワークを構築する。この実現に向けた革新的な輸送系技術研究により、宇宙輸送システムそのものに非連続な発展を起こすとともに、宇宙科学のみならず、宇宙活動全体のアーキテクチャにも革新をもたらす。

「探査」: 日本がこれまでに培ってきた探査技術を深化・融合し、共用軌道上輸送機(OTV)による軌道上輸送技術と組み合わせることで、複数機の協調探査等のより自在な現地探査を外惑星領域等のより遠方で実現し、人類の活動領域を大きく拡張する。これらの技術・経験はプラネタリ・ディフェンスなど新しい課題の解決に寄与する。

「観測」: 多様な科学観測に必要な技術の高度化と科学衛星用バスシステムの高性能化により、宇宙からの高頻度な科学観測を実現する。また、重力波等の干渉観測を可能とする高精度フォーメーションフライト技術を実現する。これらにより、観測領域をより鮮明に、かつ時間的・空間的により遠方へ拡張する。そして、このような技術やその実績をもとに、日本が大型国際共同ミッションにも参加・貢献する。

また、これらの発展に向けて、技術フロントローディング活動を強化し、大気球や観測ロケット、超小型衛星等のプラットフォームを用いた早期の技術実証および小規模科学ミッションのサイクルを確立する。加えて、ミッションを成立させるシステムズエンジニアリング、信頼性・品質、情報数理、環境解析、検証及び自律化等の横断基盤を共通方法論として確立する。JAXA宇宙戦略基金を始めとした民間の研究開発との協調を図る。新小型バスや超小型宇宙機の開発を通じて、新しい宇宙機の開発手法を探求・実証し、観測や探査に適用していく。

5. 宇宙工学分野の将来構想

■ 日本が採るべき戦略※

海外の技術戦略に対し、日本は独自の技術を活用する道を採用。輸送に関しては大気アシスト技術による宇宙往還機と深宇宙まで航行する共用軌道間輸送機を核として理想の輸送ネットワークを切り拓く。探査に関しては軌道間輸送機 (OTV) 技術を活用し、現地での探査の高度化を志向する。観測に関しては冷却等の技術を生かし、国際協調において不可欠な役割を占める。

1.「輸送」

地上から地球周回軌道への往還輸送、そして地球周回軌道から深宇宙への輸送の二本柱からなる宇宙往還・軌道間輸送ネットワークを構築・発展させ人類の活動領域の拡張を図る。地球周回軌道への輸送については、海外では既存技術をもとにスケールメリットを活かしたシステム開発を行っているのに対し、日本では機械環境条件の大幅な緩和やペイロードの完全回収を可能とする「大気アシスト技術」の獲得および適用を目指す。これにより軌道上に投入できる装置の可能性を拡張し、宇宙科学のみならず宇宙活動全体に幅広い革新をもたらす。深宇宙までの輸送では、宇宙科学の可能性を拡張する「共用OTV」の獲得を目指す。海外に比してより大型かつ遠方に到達可能な独自のOTV、地球帰還や天体表面へのアクセスに必須なEDL&R技術の発展およびこれまで打上げロケット向けに培ってきた推進技術等の応用・発展により、探査や観測の高頻度化および自在性の向上を目指す。

2.「探査」

より遠方の、より自在な探査の実現による人類の活動領域の拡張を図る。これまでに獲得した小天体接近・着陸探査技術、ピンポイント着陸技術といった独自性の高い探査・輸送技術を後続ミッションで継承・発展させる。日本として適正な規模でこれらを実施するためにも共用化されたOTVは重要であり、これを活用することで小型クラス以下のミッションで実証されてきた技術(超小型宇宙機システム、ソーラー電力セイル等)を遠方で利用することが可能となり、一層自在な探査の実現可能性も見込める。2040年代にかけて海外では表面・周回探査を伴う外惑星探査が複数計画されている。日本においても外惑星領域を含む従来より遠方の探査を視野に入れつつ、独自の自在性を活かし現地での探査の高度化を志向した世界初の形態の探査ミッションの実現を目指すべきである。また、宇宙科学研究所が獲得してきた技術(月面着陸技術、プラネタリーディフェンス等)を産業界との連携で持続可能とすることも重要である。

3.「観測」

初期宇宙、ファーストスター及び系外惑星の観測をはじめ、人類の観測領域をより鮮明に、かつ時間的・空間的により遠方へ拡張するため、多様な科学観測システムを実現する工学技術の研究開発を推進すべきである。また、2040年代以降の新たな観測ミッションを形づくる独自の観測手法及び観測システムアーキテクチャ、および必須級のバス技術の研究開発を推進すべきである。観測装置・宇宙機と、データ処理・情報数理・自律観測を一体的に発展させ、取得データを科学的知見へ転換する能力を強化する。海外では、2030-40年代にかけて宇宙史・生命の起源の解明に大きく資する初期宇宙やハピタブル地球類似惑星をターゲットとした大型観測ミッションが計画されており、これらおよび後続の大型国際共同ミッションへ日本が不可欠な役割を担い参画し続けるためにも日本が各技術分野における優位性を発展させつつ戦略的に技術蓄積することが重要となる。従来ミッションに基づく技術蓄積を発展・継承させ、軌道上実証に基づく技術の高度化を推進し、フォーメーションフライトを始めとする日本独自の観測システムアーキテクチャを主軸とした観測ミッションの2040年代での実現を目指すべきである。

5. 宇宙工学分野の将来構想

■ 2040年代を視野に入れた目標※

1. 「輸送」

【目標】地上から太陽系内のより広い範囲を自在に航行するための宇宙往還・軌道間輸送ネットワークを2040年代に成熟させるために、①大気アシスト技術を取りこんだ、機動性の高い高頻度宇宙往還機、②高頻度の軌道上輸送のための共用OTV、および③その他必要な輸送系技術の研究開発実証に取り組む。

- ・ エアターボロケットエンジンATRIUMをはじめとする大気アシスト技術を獲得する。大気アシスト技術を取りこんだ革新的な高頻度宇宙往還機の飛行実証を2030年代に実施し、これを継続的に発展させる。
- ・ 2030年代の前半には深宇宙まで航行できる共用OTVの初号機を実現する。2030年代後半から2040年代前半にも、より有効な共用性を追究し、継続的なOTV利用ミッションを通して、技術を成熟させる。
- ・ これまで打上げロケット向けに培ってきた固体推進などの輸送系技術を応用し軌道上輸送や探査に革新をもたらす。

2. 「探査」

【目標】2040年代に、日本独自の自在性に富む、世界初の形態の探査ミッションを中型および小型クラスで実現するために、下記のような宇宙機システムやキー技術を獲得する(ミッション候補:外惑星領域の探査、小天体および重力天体の(編隊飛行を含む)周回や着陸・表面探査等)。

- ・ 親機・子機協調技術(自律的な姿勢・機体制御、衛星間通信、ランデブードッキング)
- ・ 外惑星航行技術(高効率軌道設計、広温度範囲の熱制御、高 ΔV 液体・電気推進系、軽量通信系、半永久電源、大面積展開SAP、先進地上局アレイ、超高精度時刻同期)
- ・ 表面探査・サンプルリターン技術(自律探査技術、センシング技術、超小型センサ、天体表面移動・着陸、サンプル採取技術、その場分析及び試料保全技術、惑星保護技術、EDL&R技術、固体推進技術)

3. 「観測」

【目標】2040年代における科学観測システムの実現及び独自の観測システムアーキテクチャを主軸とする観測ミッションの創出。重要となる工学技術の研究開発を推進し、高頻度なミッションの実施による軌道上実証を通じて、それらの技術を高度化する。

- ・ 更なる高感度観測を可能にする極低温冷却技術および地上検証技術
- ・ 観測精度及び空間分解能の向上に資する軽量構造材料、高形状安定構造、展開・伸展構造技術
- ・ 高精度指向・低擾乱を実現する制御・アクチュエータ・推進系技術
- ・ 単一の宇宙機では実現が困難な長基線観測及び多点観測を可能とするフォーメーションフライト・高精度計測制御・自律システム・分散協調システムバス技術
- ・ 大規模・長時間サーベイを支える超高周波・光による大容量通信およびデータ処理技術
- ・ イベントドリブン・マルチメッセンジャー観測を支えるエッジコンピューティング・自律運用技術
- ・ 科学観測宇宙機のバスシステム技術、長寿命・高信頼・環境適応技術の高度化
- ・ 科学成果を最大化する情報数理・データ統合技術

5. 宇宙工学分野の将来構想

■ 今後10年程度の目標※

1. 「輸送」

【目標】大気アシスト技術の獲得と共用OTVの実現、既存の輸送系技術の拡張的發展

- ・ 小型実験機CRAFT (Compact Reusable Air-assist Flight Test rocket) を用いた技術実証実験により、大気アシスト技術を獲得する。民間等との連携により、獲得した大気アシスト技術をベースとした革新的で多目的のサブオービタルの輸送システムを開発し、それを宇宙科学実験に活用して、実利用・社会実装に繋げる。
- ・ 共用軌道上輸送機(OTV)を用いた宇宙科学ミッションを継続的に実施し、その中で共用性を追究し、より持続的で効率的な軌道上輸送の仕組みを追求する。
- ・ OTVの推進方式のオプションとしての電気推進技術や、固体推進技術による探査プローブの高機動化など、輸送系技術の新たな活用方法を創出、実現する。

2. 「探査」

【目標】以下の技術など、2040年代を視野に入れたより遠方のより自在な探査技術の獲得に向けた技術開発と実証、および内之浦後継局の整備を進めること。

- ・ OTVを用いた探査機システムひいては輸送機-着陸機の機能配分の変革(NGSR, 火星本星着陸探査STEP1)
 - ・ システムの長寿命化・自律化、自律的な軌道決定・制御、センシング、太陽電池パネルの軌道上収納(NGSR)
 - ・ 軌道間および天体上の機動性向上のための多様な推進系(DESTINY⁺, OPENS-0, NGSR)
 - ・ サンプル採取機構・受け渡し機構、深宇宙ランデブードッキング、自律協調飛行制御、試料保全(NGSR)
 - ・ ソーラーセイル、軽量薄膜太陽電池による発電(OPENS-0, NGSR)
 - ・ 遠方における熱制御および極低温における駆動機構と熱制御(DESTINY⁺, OPENS-0)
 - ・ 軌道計画や運用等の地上システムの自動化(NGSR)
 - ・ 天体表面におけるダイナミクスを理解および着陸・表面移動技術(MMX, NGSR, LUPEX, 火星本星着陸探査STEP1)
- 加えて、DESTINY⁺、Comet Interceptorの運用を通じた、小惑星フライバイおよびプラネタリーディフェンス、超小型宇宙機システム等の技術獲得を行い、自在性の更なる拡大を目指す。

3. 「観測」

【目標】現在、開発・検討を進めている、LiteBIRD、SOLAR-C、JASMINE、HiZ-GUNDAM、SILVIA、LAPYUTAの実施を通じた観測技術の獲得・実証や以下の重要技術の高度化

- ・ 極低温冷却技術(LiteBIRD、JASMINE)
- ・ 軽量高精度構造技術(JASMINE、LAPYUTA)
- ・ 高精度指向・低擾乱制御技術(LiteBIRD、SOLAR-C、JASMINE、HiZ-GUNDAM、SILVIA、LAPYUTA)
- ・ フォーメーションフライト技術(SILVIA)
- ・ 新機軸の通信・データ処理技術(SOLAR-C、HiZ-GUNDAM、SILVIA)
- ・ 新小型バスシステム(JASMINE、HiZ-GUNDAM、LAPYUTA)

【補足資料】

【補足】Ⅲ. 各分野の将来構想検討

3. 宇宙理学分野の将来構想(10年間)の読み方

- 宇宙物理学の2つの方向性としての宇宙史の解明、生命の起源の解明、そして宇宙科学領域の拡張にむけ、ここ10年の計画の具体的な目標は、
 - 宇宙開闢の謎に迫るLiteBIRD計画を戦略的中型として確実に実施する。
 - 宇宙での元素循環、天の川銀河の形成・系外惑星・太陽系惑星などを探る望遠鏡衛星による観測を XRISMによる観測の継続、公募型小型計画によるJASMINEの推進によって行い、さらに公募型小型による望遠鏡衛星の継続的な打ち上げを目指す。
 - 宇宙構造形成や系外惑星統計・大気観測を行う精密宇宙観測の経験を国際大型ミッションへの参加としてROMANでの観測に協力する。
 - 宇宙史・生命の起源の解明にむけ、科学の発展や国際的な動向も踏まえた更なる将来計画の検討を進める。
- さらに、2040年代への布石として
 - 系外惑星での生命探査を行う国際大型ミッションHWOへの構想段階からの参加を目指す
 - より精密な観測や宇宙科学領域の拡張が求められることを踏まえ、衛星開発、技術FL等の開発活動、大学共同利用を通じて、技術の高度化、先鋭化を進め、宇宙科学が宇宙開発を牽引することを目指す

- P31の図にあるように、主な軸を「宇宙史の解明」(過去から現在への時間にそった軸)と「生命の起源の解明」(現在における多様性ということで時間軸には直交)の2つに取っている。
 - 太陽系の形成過程の探求は、サンプルリターンによる過去情報の発掘、系外惑星の観測から得られる類推、統計的推定、素過程の理解も含め、「宇宙史の解明」に含まれる。
 - そのため単純な「望遠鏡」と「探査」という分けかたには合致しない。
 - 宇宙そのものではない地球的課題、あるいはそれを包含する基礎科学の両方向を「宇宙科学領域の拡張」としている。
「宇宙研がやるべきこと」なのか？と多方面から突っ込みを受けそうなことを多く含んでいるが、宇宙科学が過去の縮小コピーにならず、多分野へ拡張、あるいは多分野を牽引する可能性を示すため敢えて書く意図である。
- 日本がとるべき戦略では、新たなミッションでの成果創出として「宇宙史上のキーイベント」あるいは「生命の起源への手がかり」を主要課題として提示。
 - 宇宙科学のプログラム化を意識し、中型、存在感のある国際大型計画への参加と共に、「持続的な小型望遠鏡衛星」を加えている。また小型計画および戦略的海外共同においても、「戦略的な長期開発」に寄与することを重要視している。
 - さらに技術の高度化の必要性を陽に書いていることをアピールしておきたい。
- これらの考え方にそって、2040年代と今後10年の整理。
 - 2040年代には、2030年代に宇宙科学研究所が実現する科学および世界において2030年代に立ち上がる科学を意識しつつ、宇宙進化史としては、ダークマター・ダークエネルギー・(天の川)銀河系形成、火星からの情報を含む太陽系形成が重要かと見込んでいる。生命の起源においては、太陽圏システム科学、地球外での生命可能性の多角的な探査が重要である。
 - 今後10年については、2030年代のうちに実現したいミッションについては、キーイベントによる整理をし、2040年代にむけて、2020年代から準備を始めなければならないHWO等については特だしをしている。

【補足】Ⅲ. 各分野の将来構想検討

3. 宇宙理学分野の将来構想(10年間)の読み方

■ 太陽系の形成と太陽系形成後の物質進化(生命生存環境の形成を理解する上での鍵)

【目標】

銀河系における物質進化と、星形成から惑星多様性形成に至る過程のシームレスな理解を目指す

【実現にむけての計画】

目標の現実に向けて、まずは小天体の内部構造と各小天体タイプの比較を進めると共に、初期太陽系における同径方向の物質変化と混合を理解する。このためには、太陽系に残る始原的天体に直接アクセスして、天体近傍からの直接観測を行うことや生命を育み得る恒星系誕生の理解に不可欠な物理的証拠をサンプルリターンによって獲得することが強力な手段となる。

現在進行中のはやぶさ2拡張ミッションや今後10年の間に計画されているDESTINY⁺、MMX、そしてESAの主導するComet Interceptorへの参画などにより、小天体進化の比較研究を大きく進展させることで実現する。これに加えて、地球型惑星あるいは外惑星の主要な材料物質や前太陽系時代の物質を持ち帰ることを目指した次世代小天体サンプルリターン(NGSR)が次期中型科学衛星候補として検討が進められており、太陽系の形成や地球型惑星とそのハビタビリティの起源の解明においてこれからの10年間のその先の10年において中核的役割を果たすことが期待される。

これらのミッションを通じて太陽系小天体を理解すれば、赤外宇宙望遠鏡計画、地上大型電波干渉計により得られる、星形成領域や原始惑星系円盤における物質分布の観測と比較することで、太陽系システムの物質進化を恒星惑星系システムの普遍的文脈に位置づけることが可能となる。

■ 現在生命が存在する地球を含む惑星システムの理解と予測(生命生存環境の持続性を理解する上での鍵)

【目標】

恒星圏システムにおいて普遍的な中心恒星と惑星の形成・進化と中心恒星の変動が惑星圏に及ぼす影響の理解を進めることで、宇宙における生命生存可能システムの普遍的理解を目指す

【実現にむけての計画】

目標の実現にむけて、まずは太陽系における、中心恒星としての太陽の変動とそれが惑星に及ぼす影響を理解する。このためには、生命生存環境の可能性のある木星氷衛星をターゲットとするJUICE、火星圏をターゲットにするMMX、土星圏をターゲットにするDragonflyやOPENS-0、現在運用中のBepiColombo/Mioなどにより、異なる軌道半径や質量をもつ天体を対象として、地球型惑星の形成、プラズマ・大気環境、表層進化の比較を進めると共に、内部太陽圏における、中心恒星としての太陽の変動とそれが惑星磁気圏に及ぼす影響の理解を多点同時観測により実現する。

SOLAR-Cは、太陽大気・太陽風を形成する基礎物理過程、太陽大気的不安定化とフレア・プラズマ噴出の発生過程などの解明を目指す。これらの太陽の活動は電磁波放射、高エネルギー粒子、太陽風プラズマ、磁場を通じて太陽圏システムを形成し、惑星間空間や地球惑星環境に影響を及ぼしている。

BepiColombo/Mioは、水星磁気圏および外層大気の観測を通じて、惑星磁場と太陽風との相互作用を明らかにすることを目的としている。一方、MMXには、太陽高エネルギー粒子の観測装置が搭載されている他、火星圏における太陽風プラズマと磁場の観測も行う。

地球近傍で観測を継続するあらせ、ひのでの観測に加えて、ジオスペースとは大きく異なる環境その場での詳細観測により、惑星磁気圏と太陽風・惑星間空間磁場との相互作用の理解が深化し未来の変動の予測につなげることが可能となる。その知見は他の惑星磁気圏へと拡張され、さらには恒星圏システムにおける中心恒星と惑星圏の相互作用に関する普遍的理解へとつながり、Arielなどによる系外惑星の特徴づけと合わせて系外惑星の理解にも大きく貢献する事になる。

■ 拡張された宇宙科学

太陽系科学に関連する宇宙天気、地球防衛(プラネタリーディフェンス)は、それぞれ、太陽圏システム探査、始原天体探査と密接に関連している。SOLAR-CやMMX、BepiColombo /Mioなどによる太陽圏システム探査によって取得されるデータは、ジオスペースにおける宇宙天気のみならず、月面や火星表面における宇宙天気予報、更には、火星以遠の外側太陽系領域における宇宙天気にも必須となる観測データにもなり得るとともに、太陽圏システム探査によって解明される現象の素過程の理解を含む科学的な理解は、宇宙天気の予測精度の向上に大きく寄与する。逆に、地上の気象観測のように多点・定常・継続的なデータ取得を宇宙天気ミッションとして行うことになると、純粋サイエンスミッションとして得ることは難しい長期間の様な連続データを今度はサイエンスに使用して新しい科学成果を生み出すこともできることが期待できる。一方、NGSRなどの始原天体探査によって取得されるデータとそのデータを用いた始原天体の特性把握は、地球近傍に飛来する小天体に関して取得するデータの解釈に大きく貢献することになり、逆にRAMSESなどのプラネタリーディフェンスで取得されるデータと得られる知見は、始原天体に関する科学的知識の蓄積に大きく寄与することになる。

【補足】Ⅲ. 各分野の将来構想検討

2. 宇宙科学・探査の中期計画(2026-2036年)



【補足】Ⅲ. 各分野の将来構想検討

2. 宇宙科学・探査の中期計画(2026-2036年)

