

第4章 宇宙科学の中長期方針 ～次期中長期計画をめぐる戦略的シナリオ～

4.1 宇宙物理分野の次期中長期計画をめぐる戦略的シナリオ

4.1.1 着目すべき主要事項

「宇宙の物質と空間の起源を理解すること」、そして「宇宙における生命の可能性を求めること」は、人類の求める最も基本的な科学目標と言える。知のフロンティアを拓く課題として、「宇宙の始まりと銀河から惑星に至る構造形成の解明」を掲げ、①「宇宙はどのように始まったのか」、②「宇宙はどのように進化したのか」、さらに、その中でも③「銀河から惑星にいたる宇宙の構造の形成過程とその普遍性・多様性」の解明といった主要課題に着目する。

4.1.2 解明方法



図：4-1 宇宙の成長を時間軸で網羅的に観測する試み(©山田亨)

上図は、宇宙の始まりからの時間経過を横軸に示している。天体が遠ざかる運動をする場合に光の波長が長くなる現象(赤方偏移)を用いて観測天体の年代特定が可能なこと、観測対象(ダスト・ガス・光)

に応じた適切な波長の選択が可能なことを利用し、地上にある電波望遠鏡や各国の各種波長の天文衛星と相互補完することで、宇宙の成長を時間軸で網羅的に観測することを試みる(図4-1)。

①「宇宙のはじまり」については、初期の宇宙における急激な膨張、すなわちインフレーション現象がおきたという基本的な仮説があるが、実証されていない。インフレーション仮説を検証するためには、初期の宇宙でインフレーションの痕跡をより排他的にとどめる現象の研究が必須である。そこで、宇宙マイクロ波背景放射に残る、非常に微細だが特徴的なインフレーションにともなって生じる原始重力波の痕跡(Bモード偏光パターンと呼ばれる)をスペースからの新たな観測手法によって検出することによってこれを検証することを目指す。初期宇宙の姿そのものの理解はもちろんのこと、宇宙のすべての構造の種となる初期の密度のゆらぎはインフレーションに由来すると考えられるので、これは、まさに宇宙構造の起源を理解しようとする研究でもある。

②③宇宙の「はじまり」のあと、宇宙そのものがどのように進化したのか、そして宇宙の構造がどのように形成されて現在の多様な姿になったのかを理解することもまた主要な課題である。これによって、「なぜ宇宙は現在のような姿となり、また、宇宙で地球のような惑星が誕生し、生命の発展がもたらされたのか」という人類のもっとも基本的な疑問に対する科学的理解を進めることが期待される。そのため、宇宙の基本構造を作る物質・エネルギー(暗黒物質、暗黒エネルギー)の性質を解明する研究、その宇宙の中で銀河や銀河団などの構造がどのように作られ、そして、多様な星・惑星系の形成に至るのかを解明する研究をすすめる。

宇宙の構造形成史には、いくつかの基本的な問題が残されているが、そのひとつが、最も大質量の構造の形成過程といえる銀河団の進化過程やその過程において銀河団中心にある巨大ブラックホールが果たした役割である。銀河の形成過程、分布、構造を調べるためには可視光・近赤外線の観測が重要であるが、銀河団のような巨大な質量の天体の内部構造を調べるためにはX線による高温ガスの観測が必須である。これまでの観測では、高温ガスの運動や、ガス中の重元素イオンの出す輝線の詳細な観測が十分にできていなかったが、これを高エネルギー分解能の精密X線分光観測を用いた研究により解き明かすことを目指してゆく。

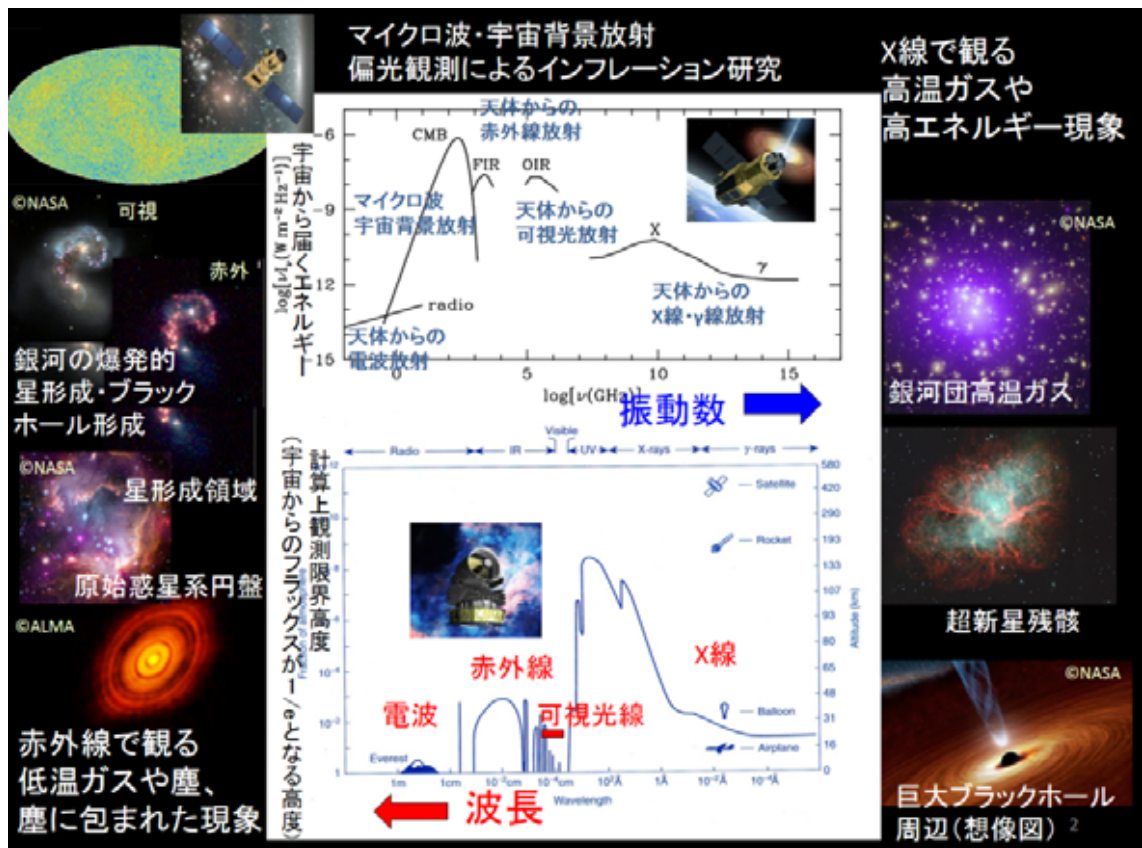
宇宙の物質進化においても、基本的な問題が残されている。ひとつは、重元素の元素合成過程の解明である。ビッグバンにおけるヘリウムなど軽元素合成、恒星中心部の核融合反応におけるヘリウム、炭素、酸素、シリコン、マグネシウム、ネオン、鉄などの宇宙で最も豊富な元素合成過程についての理解は得られているが、鉄より重い重元素の起源については十分に解明されていない。とくに、超新星爆発に伴う元素合成過程を解明するためには、爆発直後の姿である超新星残骸の高温ガス中の重元素イオンの輝線の詳細な観測が必須である。これについても、高エネルギー分解能の精密X線分光観測が主要な観測手段となる。

宇宙の物質進化の道筋を地球などの固体惑星形成や、また、有機物による生命の誕生にいたるまでをたどろうとすれば、宇宙における重元素の生成に加えて、分子ガス、固体微粒子(星間ダスト)、ひいては有機物質の生成過程を明らかにする必要がある。そこには、多量のガスや塵(固体微粒子)を伴う銀河の形成過程や、その中で巨大ブラックホールの形成過程、さらには、原始惑星系円盤のガスや水の分布などの現象が含まれるが、ガスや塵の存在やその性質は、その特徴的な赤外線の観測を用いて明

らかにすることができる。すなわち、宇宙における物質進化を解明するためには、非常に高感度の赤外線観測により、宇宙の比較的初期から現在まで宇宙史をまたぐ、天体の星間ガス・ダスト成分の観測もまた必須である。

下図は、「そもそも宇宙に何があるのか(何が見えるのか)」という問いに答えるための全体像として、「様々な波長で宇宙から届くエネルギーとそれを観測できる高度限界」を示している(図4-2)。宇宙からは可視光線だけではなく、X線も、赤外線も、電波も届いていて、そのエネルギーはそれぞれ無視できないものである為、様々な波長で宇宙の性質を調べることが重要となってくる。上で述べたように、宇宙のはじまりの観測には、宇宙マイクロ波背景放射の偏光の非常に精密な観測、そして宇宙の進化の解明のうち、銀河団のような大規模な構造に含まれる高温ガスや超新星残骸の高温ガスなど高温・高エネルギー現象については X線の観測が必須であり、一方、低温の星間ガス・ダストの観測には、中間赤外線・遠赤外線の観測が必須である。2010年代後半から2020年代にかけて、可視光・近赤外線波長帯では、米国の JWST 計画、WFIRST 計画、欧州の Euclid 計画などの大型スペース計画や TMT 計画など地上の超巨大望遠鏡、米国 LSST 広視野望遠鏡計画などがあり、また、より低温の原子・分子ガスなどを観測するサブミリ波～センチ波の電波波長帯では、ALMA 計画、SKA 計画等が稼働、あるいは実現予定である。高感度の X線観測や、中間・遠赤外線観測ミッションを遂行することにより、これらと相補的な波長帯域で、また、宇宙の成り立ちを理解する上でも相補的な研究成果を得ることが期待される。

また、2015年に宇宙からの重力波がはじめて検出されたこと、高エネルギー粒子である宇宙線や宇宙ニュートリノの観測もあわせたマルチメッセンジャー研究が今後さらに重要性を増すだろう。地上観測や電磁波以外の観測など多様な手段を用いた多波長研究、マルチメッセンジャー研究を進める。



図：4-2 様々な波長で宇宙から届くエネルギーとそれを観測できる高度限界

(イラスト©NASA, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO))

4. 1. 3 実施に際しての方針

先述の解明方法の実施に際し、より感度を求める大口径化・高精度化に対しては国際協力に主軸をおき、衛星の規模にはよらず知恵や斬新な発想に基づく新たな観測手法の開発等では主導的役割を担う方針とする。

具体的には、赤外線/X線/狭義の電波等の波長域では地上望遠鏡を含め、既存衛星の大型化・高精度化の流れであり、一国での対応には限界があるため、冷凍機・冷却システム等のキー技術を携えた国際協力と、地上望遠鏡による研究の発展との協調により、宇宙とその構造の成り立ちと進化の研究を進める。

また、宇宙マイクロ波背景放射の研究では、インフレーション仮説を日本人が提唱しており、その検証につながる初期重力波の観測を目的とした宇宙マイクロ波放射研究が進んでいることもあり、新たな観測手法の開発を進め、主導的役割を担う。

4. 1. 4 第四期中期(FY2018-2024)中の実施を想定するミッションが担うもの
(宇宙物理分野の次期中長期計画をめぐる戦略的シナリオ詳細)

① 宇宙はどのように始まったのか？

上記課題の解明にあたっては、B mode 偏光の観測により、宇宙誕生直後に生成された原始重力波の探索を行う「LiteBIRD 計画」を主導することでアプローチする(図4-3)。

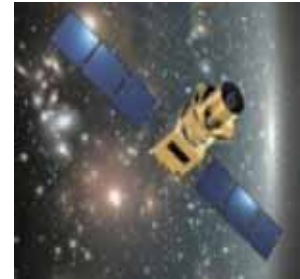


図: 4-3 LiteBIRD

LiteBIRD 計画は、宇宙誕生後約 10^{-36} 秒の世界(インフレーション期)に生成された原始重力波が存在した証拠を見つけることを目指す計画である。

宇宙の平坦性・地平線問題を解決するための仮説として、初期の宇宙での指数関数的な急激な膨張、すなわちインフレーション現象があったとする仮説が有力である。LiteBIRD は、インフレーションがおきる際に発生すると予想される「原始重力波」が宇宙背景放射に残した特別な痕跡、すなわち宇宙背景放射の偏光成分における「B モード」と呼ばれるパターンの特徴的な分布を検出することで、インフレーション現象の直接的な証拠となるシグナルを検出することを目指す計画である(図4-4)。これにより初期のインフレーションからビッグバンにつながるという、宇宙創生のシナリオを確立できることになる。

予測される非常に微小な宇宙背景放射偏光「B モード」成分を非常に高い精度で検出し、原始重力波に特徴的なパターンを検出するためには、望遠鏡を4K、検出器は 100mK という極低温に冷却して観測を行う必要がある。また、微細な偏光パターンを検出するための極低温で動作する偏光変調器の開発もキーとなる技術のひとつである。

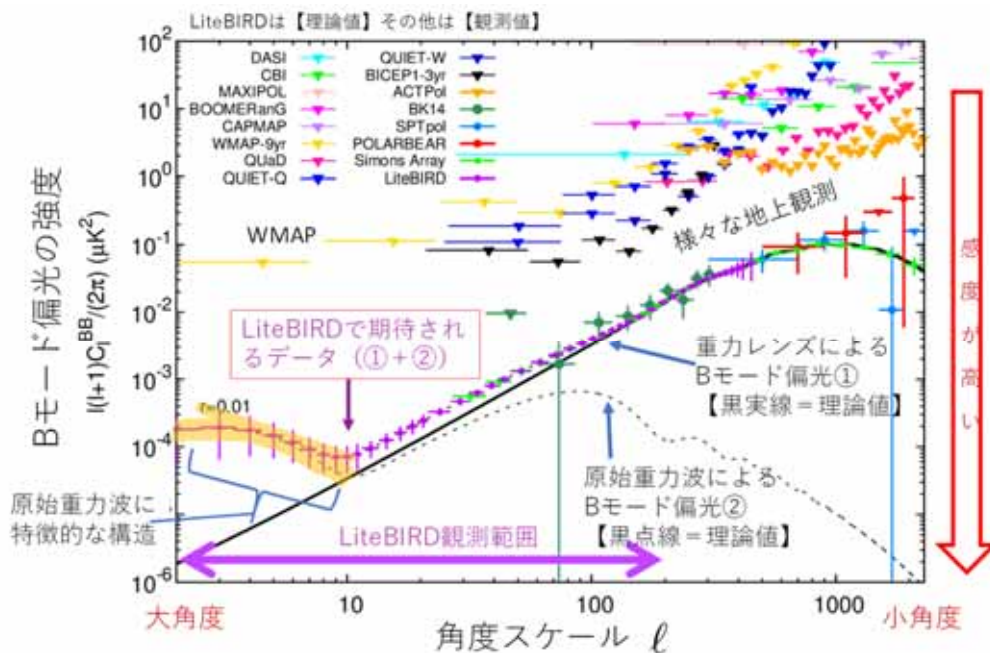


図: 4-4 LiteBIRD で期待されるデータ

② 宇宙はどのように進化したのか？

③ 銀河から惑星にいたる宇宙の構造の形成過程とその普遍性・多様性

上記二課題の解明にあたっては、X線と赤外線の世界からアプローチする。

X線波長域では、高感度分光観測により銀河高温ガスの運動等を観測し、大規模構造の形成に迫る。日本主導のX線分光撮像衛星(XRISM)と、国際協力のATHENA計画がそれにあたる。

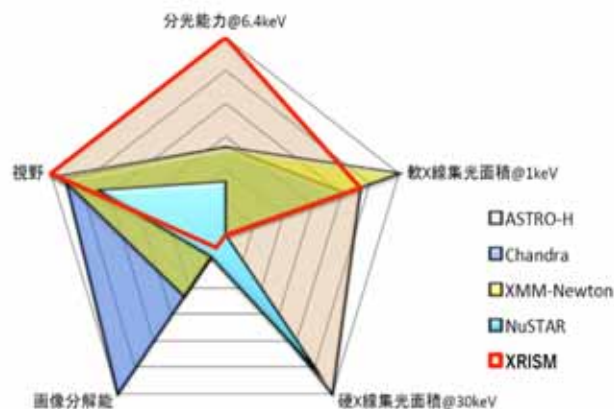
XRISMは、「ひとみ」衛星が果たすことができなかった、その主要科学目的の回復を目指すミッションである(図4-5)。宇宙の高温プラズマからのX線放射を、個々の原子・イオンが出す放射として十分に分解して調べることにより、プラズマ物理学研究の新たな分野としてこれを開拓するとともに、銀河団の成長過程、超新星爆発に伴う新たな元素合成過程、巨大ブラックホールの活動など、宇宙の構造形成を知る上での重要な鍵となる現象を理解するための研究を行う。



図：4-5 XRISM

宇宙で最大の構造である銀河団はどのように形成されたのか？暗黒物質の巨大な塊である銀河団にとりこまれた原子ガスは、どのように加熱され約1億度の高温プラズマとなっているのか？銀河団の高温ガスについては、暗黒物質などによる強い重力に加え、銀河団中心部の巨大ブラックホールの活動が大きな影響を及ぼしたという、宇宙でも最大規模となる加熱現象の存在の可能性が提唱されている。

XRISMでは、高温プラズマの個々の原子・イオンからのX線放射の光子エネルギーごとの強度をこれまでの30倍以上詳細に測定することによりその正確な運動状態などを明らかにし、巨大ブラックホール活動による激しい加熱現象の有無などを調べる(図4-6)。



図：4-6 XRISM 観測性能

地球など固体惑星の存在にとっても必須である宇宙のケイ素や鉄、そして鉄よりも重い重元素などの多くは、大質量の恒星における中心部の核反応と超新星爆発の際に作られたと考えられている。XRISMでは、超新星残骸の高温プラズマからのX線放射をネオン、マグネシウム、ケイ素、鉄、ニッケルなど個々の原子・イオンからの放射に十分に分解して観測し、宇宙プラズマの温度分布や平衡状態、放射に寄与する素過程を精密に検証することで、超新星爆発における元素合成過程の解明を大きく進展させる。「ひとみ」衛星と同様にXRISMでは高エネルギー分解能観測を可能にする軟X線撮像装置、及び、軟X線撮像装置を搭載する。軟X線分光装置の「マイクロカロリメータ」は主にNASAが開発しているが、50mKという極低温での動作が必要であり、このためJAXAでは、(株)住友重機械工業とともに低消費電力・低擾乱・長寿命の宇宙用の機械式冷凍機および冷却システムを開発し「ひとみ衛星」では軌道上で50mKを達成している。また、軟X線撮像装置では(株)浜松ホトニクスとともに宇宙用X線CCDを開発している。

赤外線波長域では、高感度分光観測により、原始惑星系円盤からの分子ガス放射等を観測し、銀河の形成に、国際協力による SPICA 計画で迫る。

SPICA 計画は、8K の極低温に冷却される大口径宇宙望遠鏡により、赤外線波長域でこれまでの 100 倍の感度での分光観測を実現する、大型の赤外線天文台衛星計画である(図4-7)。**130 億年前の宇宙から現在まで、様々な天体における重元素を含むガスやダスト(固体微粒子)からの赤外線放射を観測し、**銀河や巨大ブラックホールの誕生過程の解明、原始惑星系円盤からの惑星の誕生過程の解明などを始め、**画期的な感度で様々な天文学・惑星科学研究を行う。**



図: 4-7 SPICA

宇宙の最初期の銀河で炭素や酸素など、やがては生命現象にも重要となる重元素はどのように形成され、そしてダストや有機物質(芳香族炭化水素)は形成されたのか? SPICA では 130 億年前の激しい星形成銀河やクエーサーからの有機物質やケイ酸塩ダストの初検出を目指す。

銀河の形成期に巨大ブラックホールは同時期に形成されたのか、そして、ブラックホールの活動が星形成を止めたのか? SPICA では、多量のダストの吸収の影響がない赤外線波長帯で重元素を含むガスの電離状態などから、120億年前の宇宙の激しい星形成銀河まで、巨大ブラックホールの存在とその活動性を明らかにする。

年齢が 100 万年~1000 万年の誕生間もない原始惑星系円盤に、惑星形成領域に相当する「暖かい」ガスがどれだけ存在したのか、SPICA では赤外線波長の重水素の輝線スペクトルなどから、暖かいガスの存在量と分布・運動をはじめて明らかにし、惑星形成過程の解明に大きく寄与するデータを得る(図 4-8)。

原始惑星系円盤で、水は、気体(水蒸気)、固体(氷)の形で、どのように円盤内に分布しているのか? SPICA は、水蒸気からの赤外線輝線や、氷による吸収線の観測から原始惑星系円盤における水の存在とその分布を調べることができる

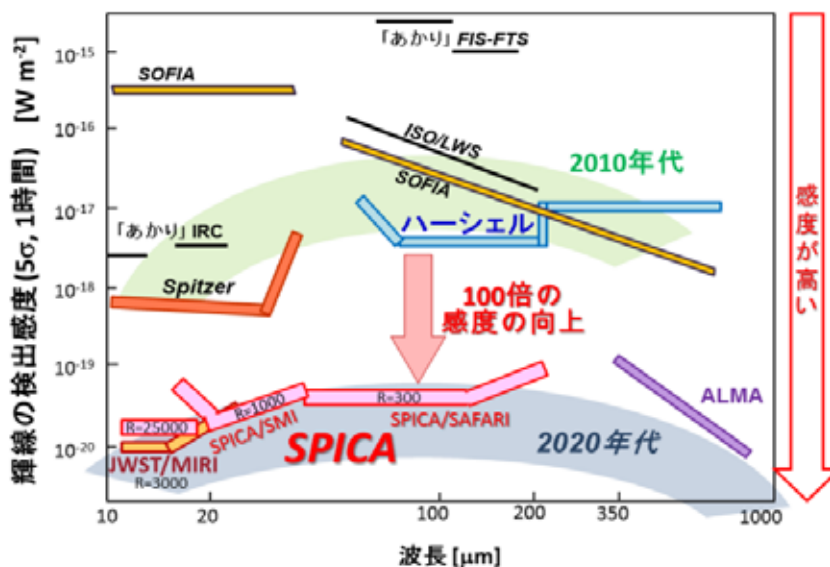


図: 4-8 SPICA 観測性能

このような赤外線高感度観測を行うため、極低温望遠鏡と極低温で稼働する焦点面装置を実現する冷却システム、低雑音の検出器、極低温で用いる高分散分光素子の開発が必要である。SPICAでは、ESA ハーシェル望遠鏡、プランク望遠鏡の技術的ヘリテージなども活かしつつ開発を行っているが、特に、JAXA では、極低温観測を実現する低消費電力・低擾乱・長寿命の機械式冷凍機および冷却システムの開発を進めてきている。

4. 2 太陽圏科学・惑星科学分野の次期中長期計画をめぐる戦略的シナリオ

4. 2. 1 着目すべき主要事項

3,000(候補は約 5,300)にも及ぶ系外惑星が確認され、そこに生命をはぐくむ環境があるのかが、天文学の具体的な観測課題になっている。探査機による太陽系生命探査も活発に行われており、惑星科学と天文学が同じ目標に向かって進む新たな時代に突入している。

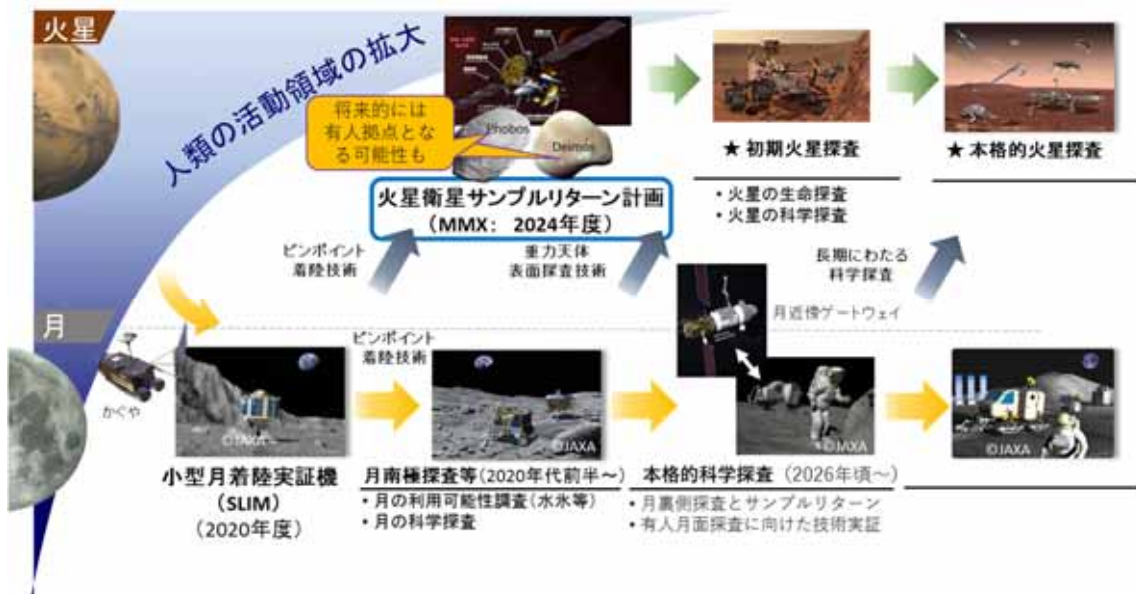
「太陽系と生命はどの様に生まれて来たかの解明」という目標に対して、天文学からのアプローチもあるが、惑星科学としては、A:「惑星・衛星の形成・初期分化」、B:「生命前駆物質の移動/供給」、C:「生命前駆物質の形成・進化」、D:「太陽系での現生命探査」といった主要事項に着目する。これらの課題解決に資するいわゆる惑星探査計画は理工連携で進めることが効果的である。リソースが限られた日本の状況において、工学側での大きな工夫によってはじめて実施が可能となる計画があることは、特に小型計画の文脈においては、認識されるべきことである。

一方で、そのような惑星科学的観点だけでなく、惑星(太陽)系の中心には恒星(太陽)があり、それが惑星環境に様々な影響を与えていること(太陽圈的・宇宙天気の観点)も忘れてはいけない。

以下では、現在、準備段階が進みつつある計画に焦点を当てて説明する。

4. 2. 2 解明方法

主要課題の A:「惑星・衛星の形成・初期分化」と D:「太陽系での現生命探査」については、重力天体探査を軸として、人類の活動領域拡大の活動と連携して解明に当たる。



図：4-9 人類の活動領域を拡大する戦略(イラスト©池下章裕)

上図に示すとおり、太陽系惑星科学分野については、効果的・効率的に活動を行える無人探査をポ

トムアップの議論に基づくだけでなく、プログラム化も行いつつ進める。プログラム化においては、月や火星等を含む重力天体への無人機の着陸及び探査活動を目標として、特に長期的な取組が必要であることから、必要な人材の育成に考慮しつつ、学術的大局的観点から計画的に取り組む(図4-9)。

主要課題のB:「生命前駆物質の移動/供給」、C:「生命前駆物質の形成・進化」とD:「太陽系での現生命探査」には、小天体探査を軸として解明に挑む。



図:4-10 ISAS の小天体探査戦略(イラスト©NASA,ESA)

ISAS の小天体探査は、「はやぶさ」・「はやぶさ2」にはじまり、SLIM、JUICE、MMX、DESTINY+、CAESAR と戦略的に進めており、上図はこれらを俯瞰的にまとめたもので、日本の惑星科学の次期中長期計画をめぐる戦略的シナリオと言うべきものである(図4-10)。太陽系の外縁で生まれた凍った泥団子(小惑星や彗星)によって、水や有機物が原始地球に運ばれたのか、運ばれたとすれば、その後どのような過程を経て地球は生命の誕生と居住が可能な天体になったのかが、現在の惑星科学の big question であり、ISAS の探査ミッションは、この big question に世界の宇宙機関と共に真正面から取り組んでいる。

4. 2. 3 実施に際しての方針

先述の解明方法の実施に際し、政策的な探査が行われる領域については、その動きと効率的に連携していくとともに、日本が先行する技術を有する領域については主導的役割を担う方針とする。

具体的には、「A. 惑星・衛星の形成・初期分化(太陽系の成り立ち解明)」に対しては、月・火星を当面の対象とし、国際宇宙探査と連携して臨む。ピンポイント着陸(SLIM)等のキー技術については、日本主導で取り組み、リソースが必要な月面南極探査等には国際協働で臨む。

「B. 生命前駆物質の移動/供給、C. 生命前駆物質の形成・進化(生命の成り立ち解明)」に対しては、生物の基本的な構成要素である物質の動向に着目し、小惑星探査においては「はやぶさ」によるサンプル帰還の成功によって世界の先端に躍り出たというヘリテージを生かして、小天体を主導的・シリーズ的に探査する。併せて、サンプル帰還カプセル技術(地上回収技術を含む)等のヘリテージを生かし、Minor Partnerとして海外プロジェクトからの引き合い(CEASAR計画等)にも応える。

「D.太陽系での現生命探査」には、リソースが必要なため国際協力で臨む。そこにおいては新規の分析装置(高精度質量分析装置、細胞検出顕微鏡等)が必要となるため、その基礎開発を進めることで、有る側面において主導する立場を確保する。

スノーラインの外で生まれた小天体は凍った泥団子(処女彗星)から多様な姿(始原的小惑星等)に進化した。そのいずれかの段階にあったものが何等かの方法で水・有機物等の揮発性物質を地球型惑星領域へと輸送したことが、それらの惑星を生命居住可能にするために必須であったと考えられている。彗星～始原的小惑星の、どの進化段階にある天体が、いつ、どうやって水や有機物を原始地球に持ち込んだのか。これは解明されるべき問題である。

MMXとDESTINY+では、それぞれ以下の側面から上記問題へのアプローチを試みる。

火星衛星の形成には、火星の位置へと飛来した小天体が関わっていたと考えられる。MMXでは、火星衛星からサンプルリターンをすることで同位体組成を含めた詳細な分析を可能にし、火星衛星の起源(ジャイアントインパクト説、捕獲説)を判別する(図4-13)。そこから、地球型惑星領域の外縁に位置する火星軌道位置、すなわち太陽系の内側と外側を接続する領域(スノーライン近傍)における小天体の振舞いを読み解き、「水・有機物等揮発性物質の地球型惑星領域への輸送」における小天体の役割を明らかにする。



図:4-13 MMX

地球の表層へと炭素等の軽元素をもたらした輸送経路として、惑星間空間を漂うダストは有力視されており、その供給源として彗星と活動的小惑星が考えられている。

DESTINY+では、地球公転軌道位置の惑星間空間、及び世界初の活動的小惑星近傍でダスト分析を行い、その化学組成を明らかにすることで天体から放出直後のものを含めて惑星間ダストの特性把握を試み、上述の「軽元素はダストが輸送した」という仮説の定量的な検証を行う(図4-14)。なお、地球公転軌道には、惑星間ダストだけでなく(恒)星間ダストの検出・分析も含まれるため、ダスト経由での分子雲から原始太陽系円盤への物質輸送も研究対象となる。探査対象天体は、ふたご座流星群の母天体である 3200 Phaethon である。



図:4-14 DESTINY+

3200 Phaethon は、サンプル帰還どころかランデブすることですら困難な軌道にある(したがって、小型機によるフライバイ観測と「その場」ダスト分析が正しい選択肢である)。同様に、地球から遠くに位置する小天体からのサンプル帰還は、その魅力の高さに関わらず、困難である。木星トロヤ群小惑星を探査するOKEANOSにおいては、トロヤ群小天体に着陸しての高度な「その場」観測を計画している。サンプル帰還計画は、持ち帰ったサンプルの分析に高性能な地上設備を活用すること、しかも、時間の経過とともにその性能が上がるメリットを享受できること、また事後に着想された新たな仮説にも対応できることを強

みとする。それに対し「その場」観測は、地上設備での分析精度・感度にははるかに及ばないものの、他天体サンプルの詳細分析からの知見が蓄積した結果の上に立てば、サンプル帰還が現実的ではない遠方の未探査天体で実施することで大きな成果を獲得する可能性を持つ。これは遠方天体こそ、B) C) という惑星科学的課題において高い価値を持つ知見をもたらすことにもよる。

D. 太陽系での現生命探査

上記課題の解明にあたっては、探査機のリソースが必要で一国の対応には限界があるため、木星衛星の氷の下に生命を探す JUICE 計画に Minor Partner として参加(国際協力)することで臨む(図4-15)。地球外の生命居住可能性の観点から、火星と巨大ガス惑星の周囲にある氷衛星が注目され、現代惑星科学の焦点であるとすら言える。氷衛星では、地球のような天体表層でのものと異なる「第二の生命居住可能性」が考えられる。氷衛星の表面は氷で覆われているが、地下では氷が溶けて海(地下海)が広がっていることがわかってきたことが、この興味を駆動している。土星の氷衛星エンセラダスのカッシーニ探査機の観測成果がその駆動力となっており、エンセラダスだけでなく、木星の氷衛星イウロパや土星の氷衛星タイタンも将来の大型探査計画の対象候補となっている。その中で JUICE は、その先陣を切って木星の氷衛星ガニメデを探査する欧州主導で日米欧が参加する計画である。ガニメデはサイズが巨大で地下海も磁場を有する等、多くの特徴を備えた天体であり、人類が初めて周回機による精査をする氷衛星として相応しいものである。日本のコミュニティの視座からは、太陽系の外側にある小天体の一つとしても位置付けることができ、「太陽系の外側における小天体の進化の理解」をキーワードとする日本の小惑星探査ロードマップとの親和性はきわめて高い。



図: 4-15 JUICE(©Airbus DS)

なお、JUICEに続く海外大型計画への参画案として、彗星サンプルリターン計画CAESARへのサンプル帰還カプセルの提供というものがある。CAESARは、NASA New Frontiers 4 の最終候補であり、その最終選定は2018年末に行われる予定である。彗星サンプルリターンは、上記B)、C)の課題解決へと大きく貢献するものである。また、日本主導で実施できる規模を超えており、工学的要素の提供を通じて日本惑星コミュニティに科学成果創出の機会がもたらされる意義は、特に、日本が主導する他の計画との親和性が強いことも含めて、きわめて高い。

4.3 宇宙工学分野の戦略的シナリオ

4.3.1 宇宙工学の長期的な目標

宇宙工学は、多面的かつ先進的な科学観測や太陽系探査活動のための宇宙へのアクセス(より自在に)と宇宙でのモビリティ(より遠くへ)を確保するため、様々な宇宙科学の飛翔機会を活用して宇宙工学研究を創造的・実証的に遂行し、宇宙科学のみならず宇宙開発利用全体の将来に向けた貢献や人類的課題の解決に向けた先駆けとなる事を目指している。

- 衛星・探査機分野では、革新的深宇宙航行システムなどによる挑戦的ミッションの創出と実行のため、図4-16に示す太陽光推進、非化学推進など革新的な宇宙航行システムの研究成果を反映させたミッション創出を図り、さらには、自律化・知能化、モジュール化やネットワーク化、及びこれをベースとした軌道上結合/分離などの革新的な衛星探査機アーキテクチャにより、宇宙開発利用全体を牽引する成果創出を目指す。

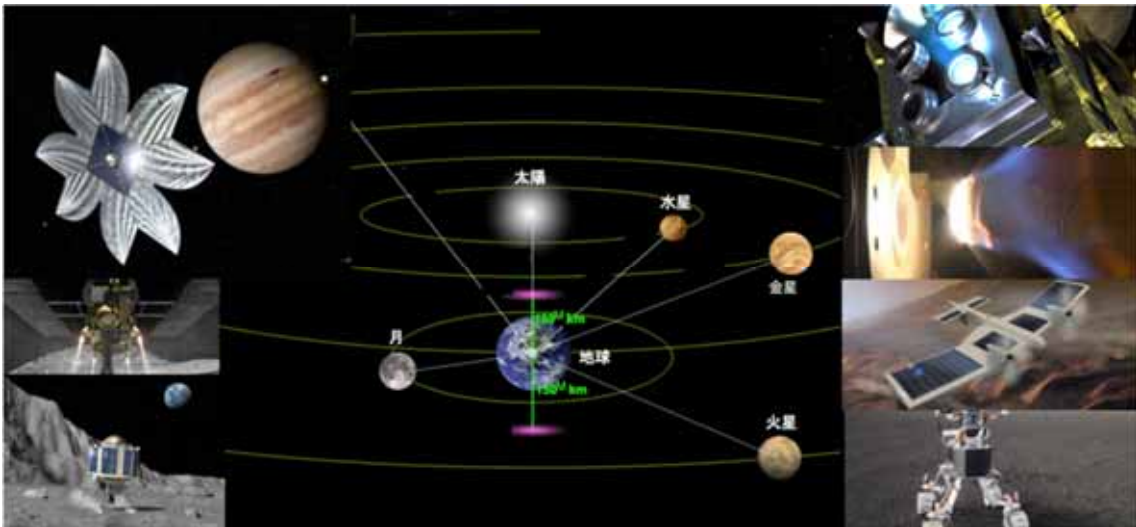
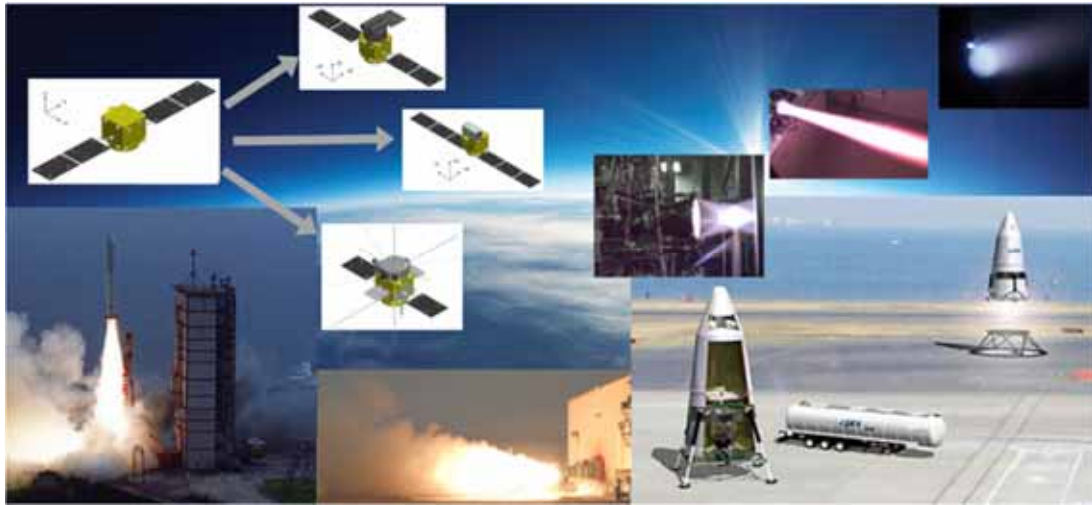


図:4-16 宇宙航行ならびに衛星探査機工学技術の革新(イラスト©池下章裕)

イオンスラスターによる惑星間航行技術やソーラーセイルにおける薄膜式太陽電池技術は、より遠い小惑星や木星土星圏の探査を可能とし、太陽系内におけるモビリティ拡大に貢献する。探査天体へのアクセスと観測の観点では、小惑星、月、火星への(ピンポイント)着陸と、ローバ・航空機等による(独自の)表面探査の機会を提供する。

- 宇宙航行・宇宙輸送分野では、ロケット推進、将来型の地上／低軌道間の輸送システム(イブシロンなど現行ロケットの段階的再使用化を含む)、軌道間の輸送、深宇宙航行のための多様な推進技術などの革新を図るための研究を、図4-17のように宇宙科学の飛翔実験機会等を活用し実証的に進めることにより、また JAXA 他部門等の研究開発の立案・実行に参画するなどして推進する。これらの成果により、宇宙輸送と航行の抜本的な低コスト化と全太陽系内へのモビリティを実現する。



図：4-17 イプシロンシステムと宇宙輸送・宇宙推進工学技術の革新

次のステップは高頻度な太陽系探査を可能にする独自の推進・輸送技術による高頻度低コスト宇宙輸送ならびに全太陽系へのモビリティの確立である。

4. 3. 2 アプローチ:実施に際しての方針

宇宙工学は、第四期中期計画宇宙科学プロジェクトにおける先進的な工学技術の開発を担い、特に太陽系探査のための宇宙航行ならびに探査技術の革新により、我が国がリードする小惑星等小天体探査技術の飛躍的な進展と、国際協働探査へと続く月・火星等の重力天体探査のための着陸技術の確立を目指す。

- 世界に誇る小惑星探査機「はやぶさ」の探査機技術をさらに磨き、宇宙航行能力と観測能力を向上させた次世代探査機にて、2020年代の国際的な太陽系小天体探査をリードする。宇宙工学は、このための戦略的かつステップを踏んだ技術開発と実証を、宇宙航行、衛星バス、プローブ等観測技術についてそれぞれ実現する。
- 小惑星以外の天体への日本独自の着陸は実現しておらず、当該技術の早急な実証が求められている。重力天体への軟着陸探査技術を確立するため、小型月探査技術実証機(SLIM)ではその独創的なピンポイント着陸技術とその関連技術を実証し、これに続く独自の月・火星ミッション、そして、国際協働探査への参加へと、展望を広げていく。

アプローチとしては、小規模ミッションまたは公募型小型クラスミッションによる挑戦的な探査技術実証を経て、これに続く戦略的中型クラスミッションによる本格探査ミッションの実現というステップをとる。また、工学実証ミッションの機会を最大限活用することで、新規サイエンス分野の創生と成果創出を図る。

4. 3. 2. 1 太陽系探査と宇宙観測のための宇宙工学技術とその戦略

科学コミュニティから切望されている大型着陸探査としては、月極域ならびに裏側地殻探査や火星生命探査があるが、これらに先立って実施すべき工学技術実証として、小型月着陸実証(SLIM)、火星突入技術実証、火星着陸技術実証がある。表面探査技術をタイムリーに取得・実証するためにも、将来の国際協働月惑星探査への参加権を得るためにも、工学ならびに理学のコミュニティによる戦略的な研究開発が不可欠であり、工学技術実証とサイエンスとを組み合わせる実施すべきである。

重力天体への着陸技術においては、SLIM による高精度な航法誘導制御則の獲得の後、大きな構造物をスムーズかつ確実にソフトランディングさせる方式へと、段階的かつ着実な発展が求められ、また、火星等の惑星への航行、突入から、大気圏航行・着陸といった技術(EDL 技術)を、ステップを踏んで着実にものにしていくことが重要である。この他の宇宙工学リードの戦略的中型ミッションとしては、木星圏土星圏ミッションとしてのソーラー電力セイル(OKEANOS)と、地球近傍小惑星ならびに金星火星圏を広範囲にカバーする深宇宙機のための技術実証(DESTINY+)とがある。これらは共に「はやぶさ」「はやぶさ2」の深宇宙航行能力を飛躍的に発展させる提案である。はやぶさや火星衛星探査(MMX)に続く小天体探査を我が国が引き続きリードするためには、より遠方の小惑星サンプルリターンを実現する技術を備え、月・火星等の重力天体からのサンプルリターン(SR)に挑んで行くことが求められるであろう。宇宙工学の挑戦は、図4-18に示す太陽系への往復航行の発展を目指しており、こうした次世代のSRを可能とするのは、多様な宇宙工学技術(打ち上げロケット、深宇宙航行能力、探査機の小型・高機能化、重力天体へのEDL・着陸のためのシステム技術)である。

天文衛星については、大型望遠鏡の高い指向精度要求と擾乱管理が求められる他、極低温における観測機器運用とそのための冷凍機技術が求められている。また、宇宙プラズマ観測については地球周回軌道にて、また、重力波観測についてはラグランジュ点における複数衛星による編隊飛行中の観測が求められるのが特長である。以上の観測のベースとなる、熱、構造、姿勢ならびに軌道制御等の工学的な技術課題を新たな挑戦と捉えて取り組む必要がある(図4-19)。

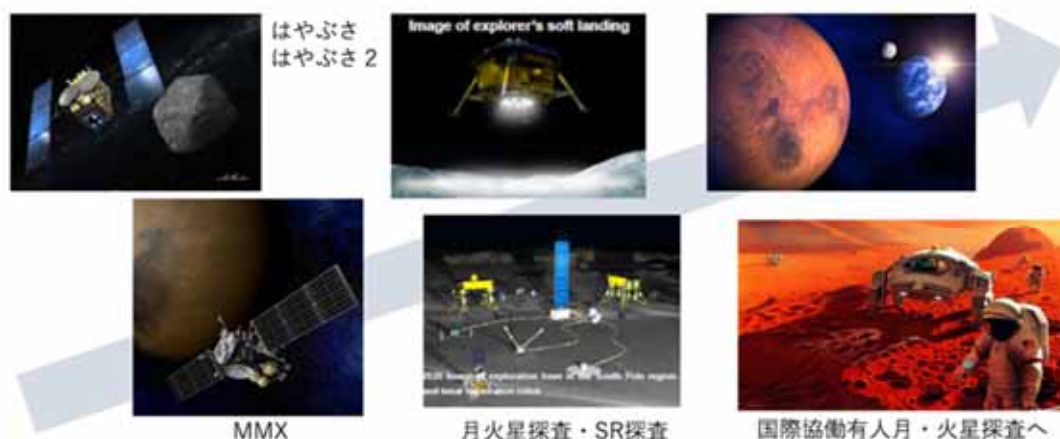
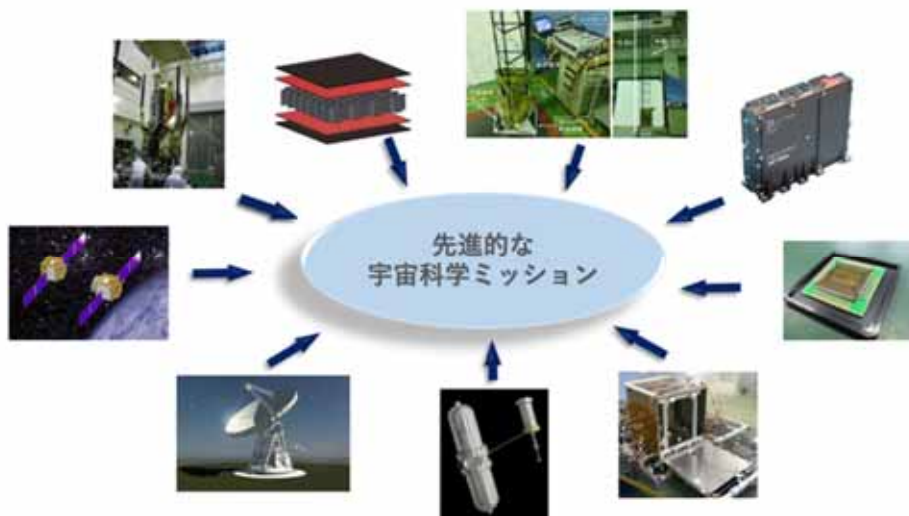


図: 4-18 太陽系探査における宇宙工学の挑戦(イラスト©池下章裕,NASA)XRISM

キーワードはサンプルリターン(往復)であり、国際協働探査へと繋がる月火星探査とサンプルリターンへと発展。



図：4-19 宇宙科学ミッションを支えるキー技術

天文衛星に必須の技術として高精度指向・低熱歪み、そのための姿勢制御系と擾乱管理、センサのための冷凍機、複数衛星が編隊飛行するフォーメーションフライトなどがあり、これらを大容量通信、搭載ネットワーク、先端的デバイス技術などが衛星バス技術として支えることで、先進的なミッションを実現する。

4.3.2.2 小型・高頻度な技術実証ミッションとこれを支える衛星バス技術

火星探査のための要素技術として地球域における火星大気突入模擬実験や、火星への小型 EDL 実証が求められており、火星着陸探査から火星 SR へと続く探査シナリオと技術戦略に基づいて戦略的に実施すべきであろう。その一方、多様な小天体を探査するためには、更に小型の PROCYON クラス (wet 重量 100kg 程度) によるフライバイ探査が有効であり、また、こうしたクラスの探査機を重力天体へと提供できれば、コスト低減効果も大きいことから、小型・高頻度な月惑星探査へと接続する。つまり、PROCYON や CubeSat クラスの超小型規格を用い、ピギーバック等の宇宙への多様な打上げ機会を利用して、低コストで深宇宙へアクセスする。そのために、超小型宇宙機と新たな増速手段(例えば、GTO 相乗りから高い軌道への遷移や深宇宙に脱出する為の、上段モータによる加速や、電気推進によるスパイラル上昇等)を戦略的に技術開発していく。この他、はやぶさで実績のあるサンプル回収システム(サンプリング機構・カプセル・地球リエントリ)を、国際協力ミッションへの小規模な参加、小型探査機による小天体探査と組み合わせること等により、研究開発成果と国際的プレゼンスを最大化することが重要である。

小型科学衛星は、いくつかの制約が生じており、次の 10 年という観点から、性能重量比において改善を図ると共に、小型月惑星探査ミッションに適合するための積極的な開発すべきであると考えられる。宇宙科学ミッションと太陽系探査科学のミッション実行可能性と頻度を拡大するため、ミッションの小型化・高度化(自律化・知能化)、衛星アーキテクチャの革新と、これと連動した打ち上げロケットの低コスト化・高頻度化を推進する。

4.3.2.3 JAXA 輸送プログラムと将来宇宙輸送系～太陽系のモビリティ確立と究極の低コスト輸送を目指して～

深宇宙投入能力確保のためのキー技術でありながら未着手の H3 上段ステージの研究開発は、推進すべき分野である。

工程表の「宇宙科学・探査」固有の課題ではないが、日本の宇宙開発全体を支える輸送系の基盤技術として、次の世代のキー技術は、ロケットの再使用技術やハイブリッド等の新規燃焼技術であり、これらをフライト実証・評価の上、次世代輸送系のシステムへと発展させていくことが期待される。

4.3.2.4 宇宙科学を超えた試み ～イプシロンシステムの広がりと小型・超小型衛星プログラム～

公募型小型宇宙科学プログラムは、日本産業界における ASHRO プログラムや、JAXA 研究開発部門の革新的衛星技術実証プログラムへと発展してその裾野を広げつつある。ほどよし衛星プロジェクト、大学等のコンソーシアムの超小型衛星等も含めた超小型衛星の取り組みを、ビジネスとして成立する出口戦略を持って進めることが重要であり、低コストで信頼性の高い超小型衛星打ち上げと運用が実現すれば、日本の宇宙開発の新しい武器となる。

4.3.3 第四期中期(FY2018-2024)中の実施を想定するミッションが担うもの

SLIM では、月をはじめとする重力天体に高精度で着陸するための技術実証を行う(図4-20)。従来、諸外国で実施されてきた月着陸の精度が km のオーダーであるのに対し、SLIM で実証する「ピンポイント着陸技術」は、画像照合航法、自律的誘導制御技術等を開発し、将来の科学探査や利用探査で必要とされる 100m オーダの精度を実現する。また、セラミック製スラスタと燃料/酸化剤一体型タンクで構成される小型・軽量で高性能な化学推進システムなど、大幅な軽量化を実現する探査機システム技術を開発する。

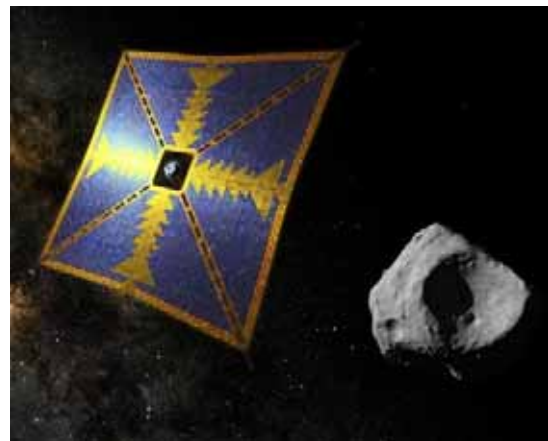
DESTINY+では、ISAS が独自開発し、シリーズとして戦略的に適用している長寿命イオンスラスタを用いた高度な軌道変換により、地球圏脱出から目標小天体への巡航まで、自在な深宇宙ミッションを可能にする航行技術の実証を行う(図4-20)。また、この電気推進を支える、大電力の薄膜軽量太陽電池パドルや、先端的熱制御デバイス(可逆展開ラジエーター、ループヒートパイプ)の開発も行う。さらには、小天体に近接フライバイし、探査機の自律機能による天体の撮像を行い、エネルギー的に着陸やランデブが困難な小型計画における探査手段の開拓を目指す。



図：4-20 小型月着陸実証機 SLIM(左)と深宇宙探査技術実証機 DESTINY+(右)

これらの小型探査機・小型衛星は、イプシロンロケットによる打上げを前提として計画されてきたものである。固体ロケットシステムは、宇宙活動の自在性を維持するためのわが国が保有する重要な宇宙輸送基盤技術であり、月惑星探査のための高性能上段固体モータ(キックステージ)の開発をはじめ、非破壊検査等の打上げシステム技術高度化の研究などを進めていく。

「より遠く」に到達する宇宙探査を行うべく、ソーラー電力セイルミッション(OKEANOS)では、過去に小型探査機 IKAROS で実現した 10 倍もの大面積のセイル膜面に薄膜太陽電池を搭載し、これと高比推力イオンエンジンを組み合わせて、日本独自の手段による外惑星領域への航行を実現する(図4-21)。本探査の目標天体は木星トロヤ群小惑星であり、これは太陽及び木星と正三角形をなす位置の近傍に存在する小惑星の総称であり、この位置に存在する小惑星は多数存在するが、人類はそのいずれにも探査機を送り込んだことがない。目標天体への着陸時に、「より自在に、より高度に」探査を実施するための技術(地下サンブラなど)の開発を行う。



図：4-21 ソーラー電力セイル探査機 OKEANOS

将来の科学衛星や探査機を支える肝となるキー技術の研究開発および実証を進める。例えば、天文衛星のキー技術である冷凍機及び冷却システム、様々なサンプルリタンの要求に応えるサンプルリターンカプセル技術、展開型柔軟エアロシェルなどを用いた大気圏突入技術、低リソースでの月惑星探査機バスを実現する小型軽量化・低消費電力化技術、ペネトレータ技術、探査天体でのモビリティ性能を向上するローバや火星飛行機、干渉計やマルチポイントでのその場観測を拓くフォーメーションフライト技術、大

型天文衛星を支える高精度構造・材料技術、極限熱環境でのミッション実現に資する革新的な熱制御ネットワーク技術、耐放射線デバイスや光通信を含む大容量通信などのエレクトロニクス、など多彩な工学研究を遂行する。

このような要素技術は、メインミッションのオプション実験や参加要請があった海外ミッションなど様々な場を積極的に活用して、研究・軌道上実証が行われる。なお、海外からのミッション参画要請例としては、NASA の CAESAR ミッションにおいて、大容量化や低温サンプルリターンなどのシビアな要求を有するサンプルリターンカプセルを、我が国が担当するケース等があげられる。

観測ロケットや大気球といった輸送インフラについても、様々な実証試験、基礎的な観測の場等として重要であり、工学的な研究を継続的に実施する。デトネーションエンジン、ハイブリッドロケット、空気吸い込み式エンジンなどの推進系や、長時間飛翔可能なスーパープレッシャー気球などの実験研究を行い、将来に備える。

第5章 まとめ

本書では、科学ミッション立案の仕組みと実行方針の変革について記すと共に、一定の予見性を確保しつつ、ボトムアップを尊重しつつもプログラム化を進めることで、一連の技術開発と科学成果の創出を戦略的に行うことを可能とすべく、宇宙科学の次期中長期計画をめぐる戦略的シナリオの初版を定めた。

4章では、着目すべき課題・その解明方法・実施に際しての方針等に加え、第四期中期計画期間（FY2018-2024）における具体的なミッション（候補も含む）が担う役割も記した。

今後のミッション選定にあたっては、当該ミッションの本文書における位置づけも考慮されるべきであるが、民間企業や最新の技術動向・各国の政策等の世の中の情勢を鑑みて、本文書自体も適切に見直す（維持・改訂）ことが重要である。