

宇宙科学技術ロードマップ

初版

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

2019年3月29日

目次

1章 本文書の目的と位置づけ	5
2章 概要 ～ミッションロードマップ～	8
3章 ミッションRMの実現に必要な技術(技術領域別)	10
3.1 天文学・宇宙物理学	10
3.2 宇宙工学	14
3.3 太陽系科学(太陽系探査・太陽圏科学)	21
3.4 戦略的に獲得すべき宇宙科学技術リスト	23
4章 直近ミッションの実現に必要な技術(ミッション別)	33
4.1 XRISM	34
4.1.1 ミッション概要	34
4.1.2 日本の役割／海外からの寄与	34
4.1.3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	35
4.1.4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	35
4.2 LiteBIRD	36
4.2.1 ミッション概要	36
4.2.2 日本の役割／海外からの寄与	36
4.2.3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	36
4.2.4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	37
4.3 SPICA	38
4.3.1 ミッション概要	38
4.3.2 日本の役割／海外からの寄与	38
4.3.3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	39
4.3.4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	39
4.4 小型 JASMINE	40
4.4.1 ミッション概要	40
4.4.2 日本の役割／海外からの寄与	40
4.4.3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	41
4.4.4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	42
4.5 Solar-C EUVST	43
4.5.1 ミッション概要	43
4.5.2 日本の役割／海外からの寄与	44
4.5.3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	45
4.5.4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	45

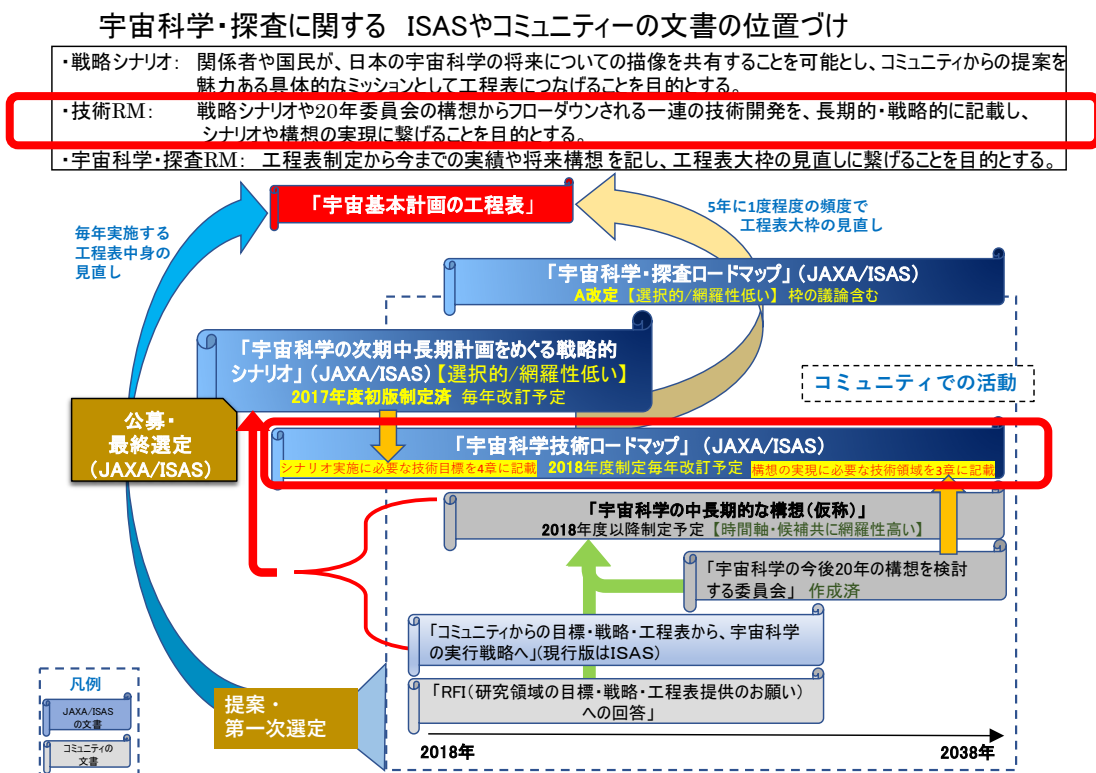
4. 6	HiZ-GUNDAM.....	47
4. 6. 1	ミッション概要	47
4. 6. 2	日本の役割／海外からの寄与	48
4. 6. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	48
4. 6. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	48
4. 7	MMX.....	50
4. 7. 1	ミッション概要	50
4. 7. 2	日本の役割／海外からの寄与	50
4. 7. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	50
4. 7. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	51
4. 8	OKEANOS	52
4. 8. 1	ミッション概要	52
4. 8. 2	日本の役割／海外からの寄与	52
4. 8. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	53
4. 8. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	53
4. 9	SLIM.....	55
4. 9. 1	ミッション概要	55
4. 9. 2	日本の役割／海外からの寄与	56
4. 9. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	56
4. 9. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	56
4. 10	DESTINY+.....	57
4. 10. 1	ミッション概要	57
4. 10. 2	日本の役割／海外からの寄与	57
4. 10. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	57
4. 10. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	58
4. 11	JUICE	59
4. 11. 1	ミッション概要	59
4. 11. 2	日本の役割／海外からの寄与	59
4. 11. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	59
4. 11. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	60
4. 12	CAESAR	61
4. 12. 1	ミッション概要	61
4. 12. 2	日本の役割／海外からの寄与	61
4. 12. 3	日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術	61
4. 12. 4	上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果	62

5章 まとめと今後	63
-----------------	----

1章 本文書の目的と位置づけ

ボトムアップによるミッション立案を基本としつつも、技術とサイエンス両面におけるプログラム化による戦略的なミッション実施の必要性が増している中、宇宙基本計画の工程表の「宇宙科学・探査」の考え方とも整合した「宇宙科学の次期中長期計画をめぐる戦略的シナリオ」を2018年度末に策定した。これにより、宇宙科学分野におけるプログラムの全体像や目的の明確化を図り、宇宙探査に一定の予見性を確保し、一連の技術開発と科学成果の創出を戦略的に行うことで、魅力ある具体的なミッションとして工程表につなげる。

宇宙科学技術ロードマップ(本書)では、上述の戦略シナリオや、別途理工学委員会タスクフォース「宇宙科学の今後の20年の構想を検討する委員会」の提言書「2030年代以降の宇宙科学に向けた提言」に記載されているミッションなど実現するために必要な一連の技術開発を、長期的・戦略的に記載する。前者(戦略シナリオ)の実施に必要な技術目標を本書の4章に、後者(長期的なミッション構想)の実現に必要な技術領域を本書の3章にそれぞれ記載する。後者は「技術のフロントローディング」の候補にも繋がっていく。



点線内は“主として”コミュニティの活動を示し、下から上にある程度時系列に流れている(戦略シナリオと技術RMは時系列が逆)。主として書いたのはRFI回答を網羅性高くまとめた「実行戦略」は現行

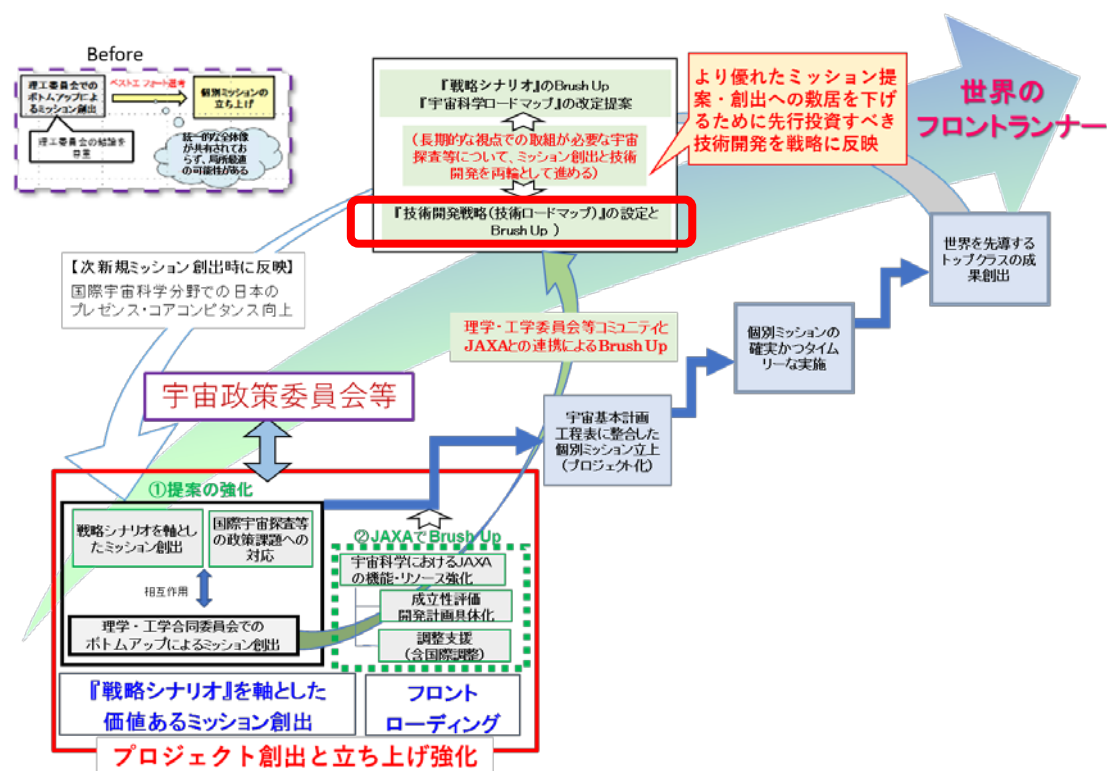
ISAS 文書なため、それに変わるものとして、20年委員会報告書も踏まえて、「宇宙科学の中長期的な構想(仮称)」という、時間軸も候補軸も網羅性の高い文書をコミュニティのクレジットで制定する予定。

宇宙理学・工学委員会では、「宇宙科学の実行戦略 ver0.16」をさらにより長期的な視点に立ったものに補完すべくタスクフォース「宇宙科学の今後の20年の構想を検討する委員会(以下、20年委員会と略称)」による検討を行い、さらにその報告書「2030年代以降の宇宙科学への提言」を踏まえたうえで、「宇宙科学の中長期的な構想(仮称)」という、時間軸も候補軸も網羅性の高い文書をコミュニティのクレジットで制定する予定である。

コミュニティが網羅性高くして詳細な「中長期的な構想(仮)」をまとめたなら、その中からより実現に近いものを戦略シナリオに加えるという想定。

左側の青矢印は、毎年実施する工程表の中身の個別更新に向けての流れで、具体的なミッション選定を反映するイメージ。

それに対して、右側の黄矢印にある「宇宙科学探査 RM(A 改定)」は、5年に1度程度の工程表大枠の見直しに資する文書で、戦略シナリオからピックアップした有力ミッションの記載に加えて、枠の議論(150/300等)も記載する。



科学ミッション立案の仕組み変革に際しては、提案の強化と JAXA による洗練を行うことにより、プログラム化の推進をはかる。

①提案の強化:

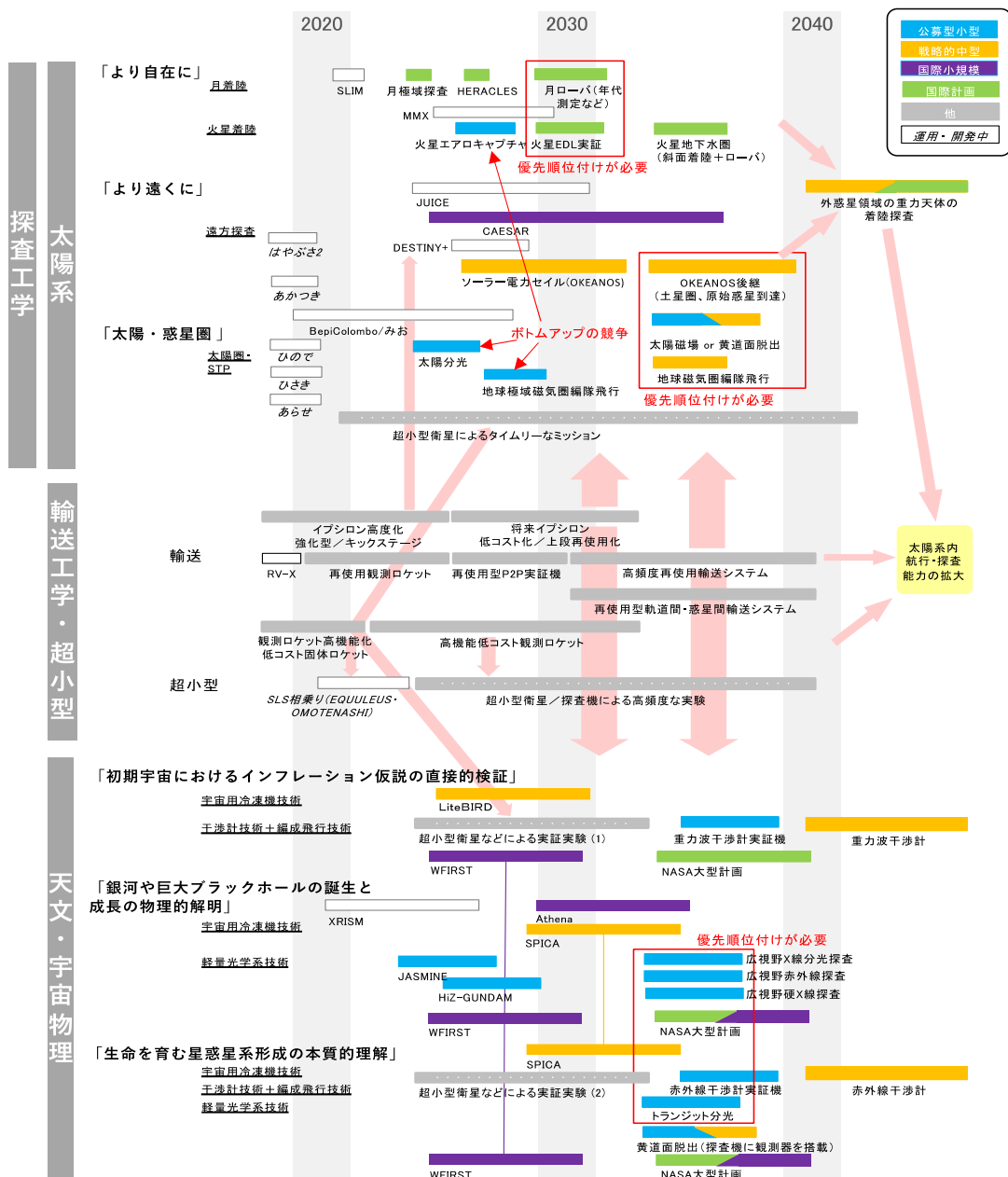
理工学委員会からのミッション創出提案に加え、国際連携を含む JAXA 先導の提案や国際有人宇宙探査等政策課題への対応も加味しつつ相互作用させることで、ミッション提案の強化を図る。

②JAXA による Brush Up（フロントローディング）:

ISAS が JAXA 内で連携して、成立性評価（キー技術の研究開発等によるフロントローディング含む）と開発計画の具体化、国際調整機能、維持改定を行う「次期中長期計画をめぐる戦略的シナリオ」との整合性確認などを行う機能を強化することで、提案ミッションの実現性向上・開発リスク低減化を図る。

2章 概要 ～ミッションロードマップ～

本章では、太陽系科学、天文・宇宙物理学、宇宙工学の各分野について、世界的潮流、我が国が目指すべき方向、そこに向けて持続的発展を遂げるためのシナリオを提示する。考えるシナリオの一つとしてタスクフォース「20年委員会」にて検討したミッションロードマップ例を線表にまとめた。この線表では上部に太陽系科学と工学、下部に天文学宇宙科学の2030年をまたいだミッションロードマップ案が示されており、これら支える宇宙輸送と超小型技術と強く関連し合う理工連携の構造が読み取れる。カラーバーはおおよそのミッション期間を示す。



コミュニティにおけるミッションロードマップ検討例

(2030年代以降の宇宙科学に向けた提言 - MMX/LiteBIRD/OKEANOS/SPICA のその先へ -)

宇宙理学・宇宙工学委員会下の20年委員会による提言書から

なお、本シナリオは、20年委員会委員による見識に基づいてミッションの絞り込みを行っておけるものであるが、並行して、各研究コミュニティでも将来計画については、様々な検討がなされている。

太陽系探査では、火星のアクセス困難地域と、スノーラインを超えた遠方の始原天体や内部海を持つ木星や土星の衛星とが、極めて科学的価値の高い未踏領域である。SLIM に続く月ミッションにて重力天体着陸技術を磨きつつ、火星と遠方の未踏領域探査へと挑むことで「より自在に」「より遠く」を実現し、長期的には遠方の重力天体の着陸探査を日本独自に実行する。一方、太陽地球系物理学（STP）分野を含む太陽圏科学では、太陽-惑星系の変動と共進化の理解を掲げ、多角的な太陽観測を小型衛星で実現するとともに、太陽圏内部領域や外惑星の電磁気圏探査、惑星間空間の多点同時観測、黄道面脱出などを旨とする。

宇宙工学は、工学技術によって宇宙科学ミッションを先導するだけでなく、同時に探査機・輸送システム等の宇宙工学全般に及ぶ革新をもたらすものである。太陽系探査としては、宇宙航行能力に加えて高効率発電、省電力技術、低温技術を向上させた次世代探査機で2020年代以降の遠方探査をリードするとともに、重力天体への着陸と表面探査の技術を獲得する。輸送システムについては、まず、宇宙科学が共に歩んできたイプシロンロケットについては、最低限、火星領域へ探査機を輸送できるだけの能力増強が必須である。短中期的には再使用観測ロケットを構築して実利用することにより効率的な運用技術を確立するとともに、長期的には完全再使用型の輸送システムによる高頻度宇宙輸送や軌道間輸送を実現する。超小型衛星は今後の宇宙科学において独創的なサイエンスを短いサイクルで実現するための有効なプラットフォームである。深宇宙探査での本格活用のために、超小型衛星用の推進系や、電力、通信、熱設計技術の革新が必要である。超小型衛星は、これまでに大学を主体として取り組まれてきたが、深宇宙探査も含めて、長期ビジョン実現の一翼を担う飛翔機会とする。

天文・宇宙物理分野では、物質と空間の起源と進化、系外惑星、地球外生命が長期的な研究課題である。将来20-30年後までに望まれる成果として、(1)初期宇宙におけるインフレーション仮説の直接的検証、(2)銀河や巨大ブラックホールの誕生と成長の物理的解明、(3)生命を育む星惑星系形成の本質的理解、などが挙げられる。この先5-15年以内の打ち上げが見込まれる中・大型ミッションとしては、例えば LiteBIRD と XRISM の戦略的中型ミッションや、ESA との共同ミッションである SPICA、そして Athena や WFIRST といった海外大型ミッションへの参画が予定されている。また、(1)や(2)に繋がる先鋭的な成果を目指して、HiZ-GUNDAM や小型 JASMINE といった公募型小型ミッションが提案されている。今後の戦略としては、欧米で進む巨大ミッションの流れに追従するのみではなく、広視野サーベイ観測、宇宙干渉計観測、トランジット分光、マルチメッセンジャー・タイムドメイン天文学など、広視野・高波長分解能・高安定性・高い即応性のいずれかなど焦点を絞り、小型ミッションでも行える先鋭的なサイエンスを見極めて世界に先駆けて遂行し、これまでも培ってきた宇宙用冷凍機をはじめとする、キーとなる技術を特定して伸ばすことによって、世界がリードする巨大ミッションにピンポイント的に存在感を持って参画する。我が国が主体となってやりきれない小型衛星クラスで実現可能な革新的観測手段として、編隊飛行による赤外線ならびに重力波宇宙干渉計の実証をすすめ、我が国が主体となり海外計画とも相補的な「宇宙干渉計」を構想する。

3章 ミッションRMの実現に必要な技術(技術領域別)

宇宙科学においては、理工学の各コミュニティからのボトムアップによる競争的かつ協調的なミッションの推進が基本である。コミュニティを中心としたミッション推進を基本としつつ、かつ、ミッションが大型化・高度化する中で我が国の宇宙科学計画を持続的に発展させるためには、ミッション群の段階的实施により技術をステップアップさせるための「プログラムの」戦略が不可欠である。JAXA 中期計画では2030年までのミッションが示されているが、2030年代以降と遠い将来までを確定的に予測することは難しい。しかしながら、科学的価値や実現可能性を総合的に鑑みて宇宙科学ミッションの将来展望を示し、長期的に投資すべき課題をある程度絞り込んだうえで、それでも残る複数のパスを確実に追求していくことは可能であろう。そこで本章では、天文宇宙物理学・宇宙工学・太陽系探査の3分野において、次の4項目のいずれかに相当する重要技術を識別し、宇宙科学ミッションとの関連と技術の研究開発方針について記載した。

- A) 日本が実施する特徴ある科学ミッションを実施する上で必須となる、世界初の技術
- B) 従来から日本が強みを持った技術であり、さらなる技術開発によって飛躍的な科学成果が得られるもの
- C) 国際協働探査へと接続・発展することが期待され、将来の基盤技術となるもの
- D) 宇宙科学の枠組みを超え、宇宙開発全般、あるいはその他の分野において革新的でステップ的な発展につながるもの

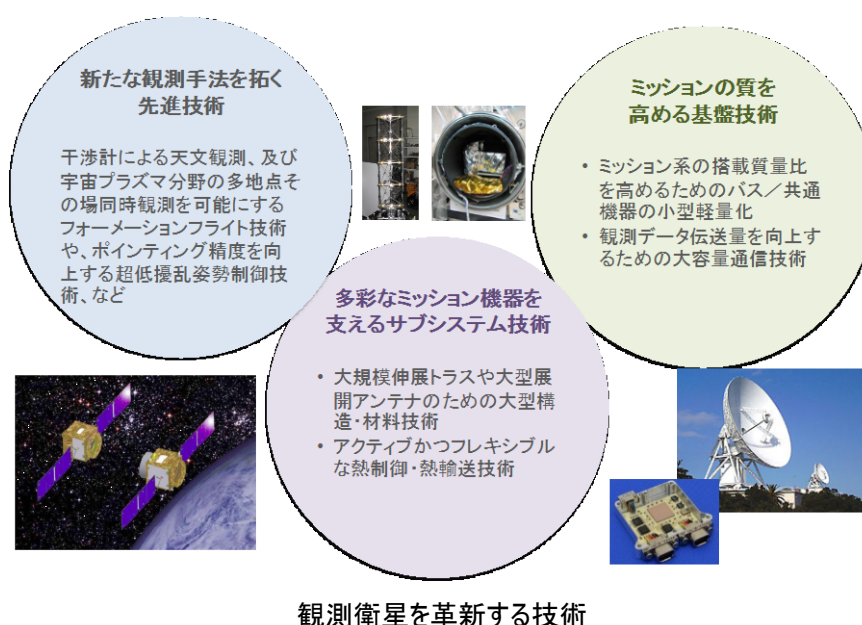
3.1 天文学・宇宙物理学

天文学・宇宙物理学分野では、前世紀以降、あらゆる電磁波の波長において観測研究の急速な発展があり、それに牽引された理論の進展によって我々の宇宙観は大きな変貌を遂げた。現在の天文学・宇宙物理学は、宇宙の物質・空間の起源と138億年の宇宙進化史を明らかにすること、系外惑星の形成過程の解明、そして地球外生命の探査を大きな目標としている。より具体的に、将来20-30年後までに望まれる成果として、(1)初期宇宙におけるインフレーション仮説の直接的検証、(2)銀河や巨大ブラックホールの誕生と成長の物理的解明、(3)生命を育む星惑星系形成の本質的理解、などが挙げられる。この先5-15年以内の打ち上げが見込まれる中・大型ミッションとして、例えば LiteBIRD は(1)に、XRISM や Athena は(2)に、SPICA や WFIRST は(2)と(3)に多大な貢献をすることが期待できる。また、(1)や(2)に繋がる先鋭的な成果を目指して、HiZ-GUNDAM や JASMINE といった小型ミッションが提案されている。

上記の目標を達成するために、今後、欧米のミッションは益々、大型化が進むことは必須である。そのなかで、我が国の人的・経済的規模を考えた場合、そのまま世界の流れに追従して大型化の波に吞まれるのではなく、20年後を見据えて我が国独自の路線・戦略を採ることも重要である。具体的には、(A)

小型ミッションでも行える先鋭的なサイエンスを見極め、世界に先駆けて遂行する。小型ミッションに特化した挑戦的な技術の開発を進め、その先の巨大ミッション用の技術として世界に提案・提供することも念頭に置く。その一方で、(B) 巨大ミッションをリードすることは考えずに、世界がリードする巨大ミッションに、我が国が「存在感」を持って参画する。そのために、世界に誇れるキー技術を特定して伸ばし、戦略(A)を通して、宇宙用技術としての実績をあげる。戦略(A)では、必ずしも高感度を追及するのではなく、「高空間分解能」、「広視野」、あるいは「高即応性」を極めることで、科学的意義を高める。

以上の観測手段を実現するための技術としては、宇宙用冷凍機技術の高性能化、軽量光学系技術、編隊飛行技術、ならびに干渉計技術が特に重要であり、下記に説明した。図では、観測衛星を革新する技術群、ならびに関連するロードマップを示した。

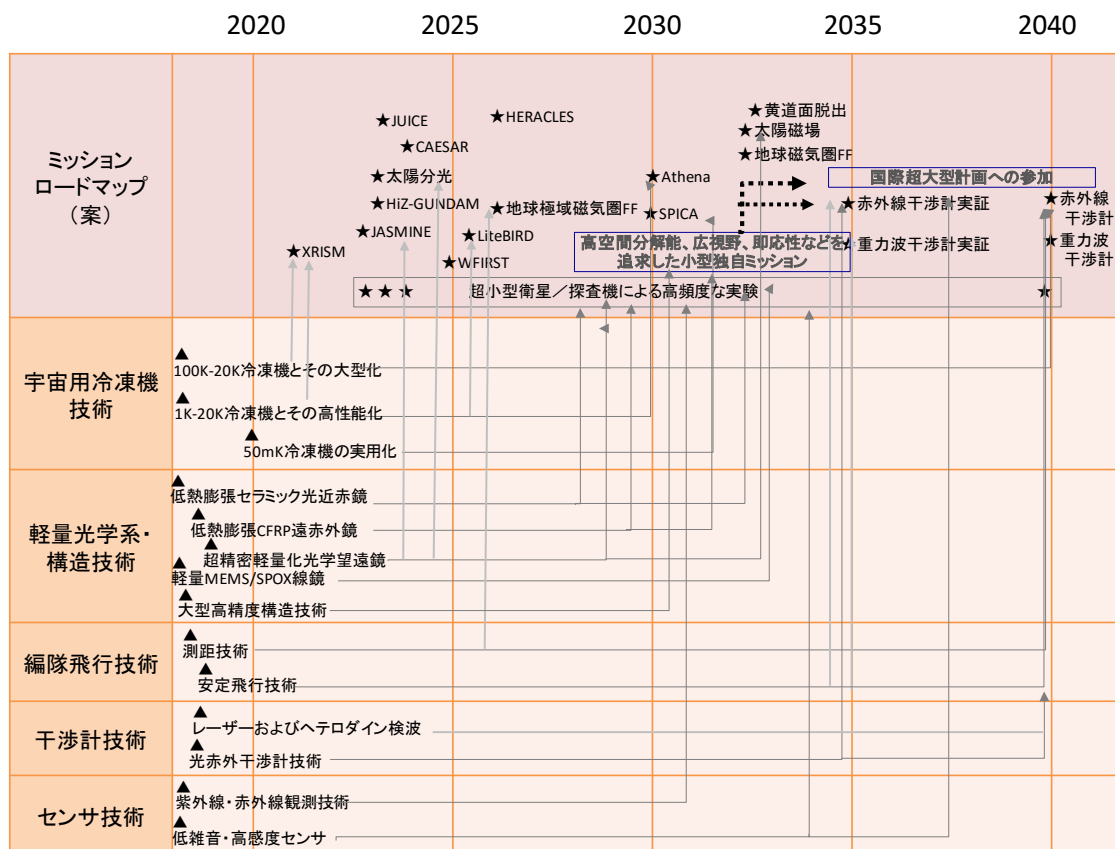


(1)宇宙用冷凍機技術

日本はこれまで、赤外線や X 線分野で「あかり」「ひとみ」に代表されるような液体ヘリウムと機械式冷凍機を組み合わせた冷凍システムの軌道上実証に成功してきた。近い将来では SPICA、LiteBIRD などのミッションが提案され、また ESA の Athena 計画へのカロリメータ冷却系への協力を検討している。新たにこれらに必要な冷却技術としては、無冷媒かつ長寿命であることがキーとなる。

100 mK などの極低温冷却に関しては、断熱消磁冷凍機(ADR)、希釈冷凍機等の開発を行ってきたが、未だ軌道実証に至ったものはない。冷凍機、ヒートスイッチ等の冷却技術のみならず、センサへの配線、温度計測等の実装技術も含め技術確立が必要である。この分野は民生の開発も進んでおり、宇

宙応用に向け、大学等にも開発を期待する分野である。



天文学・宇宙物理学の技術ロードマップ

数 K までの冷却に関しては我が国の Joule-Thomson 式冷凍機が、冷却能力および効率の面で世界のトップクラスにあるといえる。ただし、冷却能力、寿命等ミッションからの要求に合わせたカスタマイズと標準技術としての確立のバランスをとりつつ、今後も開発は必要である。

今後、宇宙用冷凍機・冷却系技術の価値はますます高くなると考えられるため、「宇宙用冷凍機技術の高性能化」を我が国の強みとして、これを持って巨大ミッションに参画する道が考えられる。

(2) 軽量光学系技術

科学要求から、必然的に望遠鏡の有効面積は増大し、ミッションは巨大化していく方向にある。限られた搭載手段、厳しい打ち上げ振動環境、苛酷な熱環境という条件下での望遠鏡の軽量化というのは、地上観測装置にはない飛翔体観測での独自の要求となる。「あかり」望遠鏡をさらに軽量化し、口径1-1.5 m 級で重量20-30 kg の超軽量鏡を実現し、イプシロン級の小型ミッションで天文観測を可能にすれば、ミッション提案の可能性が広がる。

同様に、太陽観測など太陽系天体の観測においても、「ひので」で実現した精密望遠鏡の大幅な軽量

化を図り、中型望遠鏡(0.8-1 m 径)のイプシロン級小型ミッションでの実現を可能にすれば、搭載機会が限られるなかで、観測手段の革新と日本が得意とする高解像度観測を連携させ、今までにない特徴のある観測を実施できる。

(3)編隊飛行技術(フォーメーションフライト)

天文分野や STP 分野の将来計画において編隊飛行は要である。例えば、磁気圏観測では、4機の衛星で正四面体を構成すること、衛星間距離は1~1000km をミッション期間中に可変とすることが求められている。また、極域磁気圏の観測のために、複数機の衛星で直線隊形あるいはレコード盤隊形での観測も構想されている。いずれの場合にも編隊飛行の要求精度は制御完了時で10%程度である。衛星の相対位置決定精度・時刻決定精度としては、衛星間距離が L km の時にそれぞれ $L/100$ km と $L/1000$ msec が要求される。一方、天文分野の赤外線干渉計や重力波干渉計では、より高い精度が要求される(次項目を参照のこと)。

編隊飛行を形成・維持する相対航法誘導制御技術、および観測ミッション実施中に高精度で相対位置を保持する精密航法誘導制御技術の研究を推進する必要がある。すなわち、航法センサを高精度化させた粗制御と、観測センサ情報までを組み合わせた精制御を協調させる超精密制御が重要となる。アーム長10 m 程度の編隊衛星観測(FFAST)にて相対位置制御型の編隊飛行システム研究が実施された他、宇宙重力波干渉計など相対加速度要求が高いミッションに向けた精密制御用イオンエンジンの研究も実施されているが、いずれも限定的である。編隊飛行に関する要素ならびにシステム研究を、将来天文ミッションなどが求める要求の実現へ向けてプログラマ的に実施することが求められる。

(4)干渉計技術

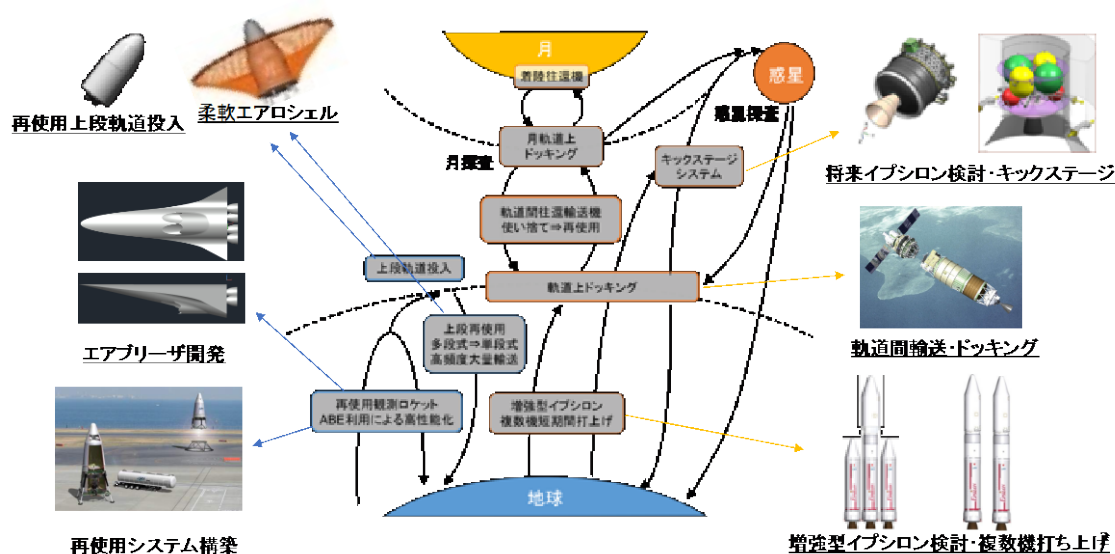
赤外干渉計の基線長は、遠赤外線で1 km 以上(ALMA 相当かそれ以上を目指す)、近・中間赤外線で10-100 m 以上(地上望遠鏡相当かそれ以上を目指す)が必要である。このとき編隊飛行に必要な精度は、遠赤外線で100 mm、中間赤外で10-100 mm、近赤外線で1-10 mm である。これらを実現するための技術としては、先に述べた編隊飛行技術に加え、高周波擾乱の制御技術、高精度な測距技術、長基線赤外線干渉技術、ナール干渉技術が必要である。

重力波干渉計では、基線長として100 km ないしは1000 km が想定されている。距離の絶対精度の要求値は500 m ないし5 km 程度であるが、0.1-10 Hz の周波数帯における重力波を捉えるためには、そのゆらぎスペクトルが10-18 m Hz^{-1/2}程度以下である必要がある。衛星に対する外力雑音を低減するためのドラッグフリー技術、高い変位感度を実現するための長基線レーザー干渉計技術、外力雑音の抑圧技術が必要である。これらの技術開発を小型衛星等を利用して2030年頃を目処に実現し、2040年頃に干渉計ミッションの実施を目指すシナリオが考えられる。

3. 2 宇宙工学

宇宙工学は工学技術によって宇宙科学ミッションを先導し、同時に探査機・輸送システム等の宇宙工学技術に革新をもたらすことをその目的としている。宇宙工学には、理学観測の要求に基づくキー技術に対して各サブシステムの英知を投入して取り組むことが求められている。例えば、編隊飛行技術については誘導制御系、推進系、通信系にまたがる要素技術を系統的に統合することで、また、冷凍機に代表される低温技術については熱制御分野の継続的な性能向上の取り組みにより、理学要求を満足し得る技術を開発していく必要がある。これらと強く関連しつつ、宇宙工学コミュニティとして将来の宇宙工学の柱となる技術の開拓に挑戦し続けることが重要である。それは以下に挙げる、宇宙輸送システムの革新、次世代探査・衛星技術、超小型探査機による深宇宙探査の3分野である。これらと将来の理学観測の要求に基づくキー技術を合わせ、計4分野の研究開発を重点的に推進していくことが必要である。

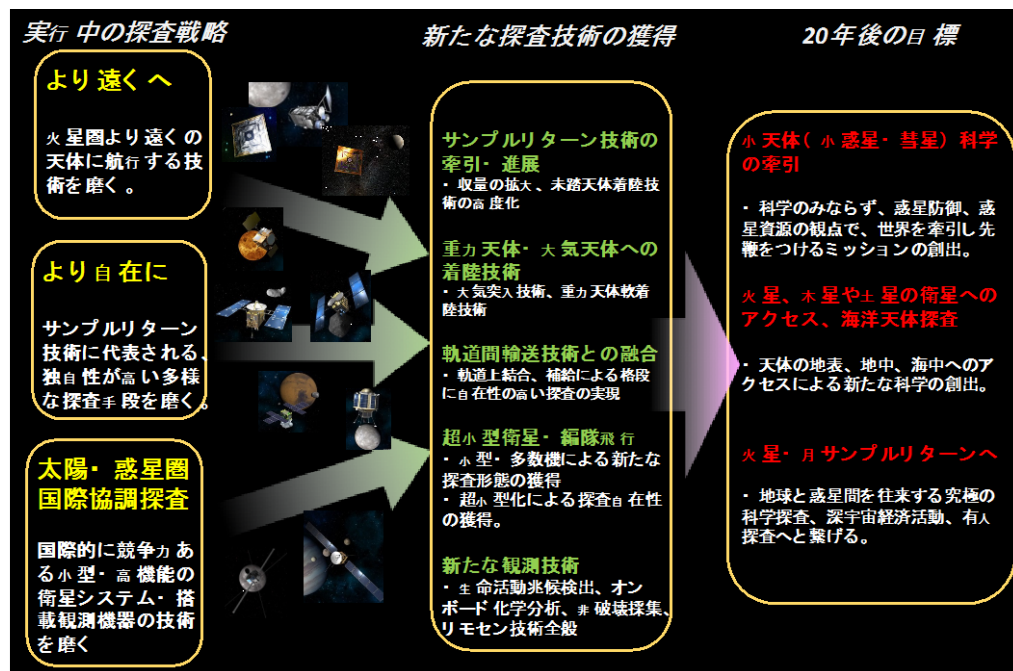
- 宇宙輸送系技術を革新することで、多様な宇宙科学の世界をカバーする軌道間輸送ネットワークを実現する。地球周回の小型宇宙科学ミッションを可能にしたイプシロンシステムを進化させた次世代イプシロンにて、高頻度な太陽系探査を実現する。また、ロケット再使用化の世界的潮流を作ってきた再使用ロケットの実証と探査への応用を推進し、地球近傍ならびに太陽系内各天体における軌道間輸送を実現する。二段式の完全再使用型宇宙往還機 TSTO を実用化し、低軌道への輸送コストを現在よりも2桁下げつつ、現在の航空機並に安全かつ効率的な運用を確立する。また、単段式の宇宙往還機 SSTO・有人輸送を実現する。軌道間輸送ネットワークは、チャーター便、定期便などの輸送サービスを実現することで、宇宙科学の多様性を一気に高め、全く新しい宇宙科学を生み出す母体となる。



宇宙輸送技術の革新

多様な宇宙科学の世界をカバーする軌道間輸送ネットワークの構築

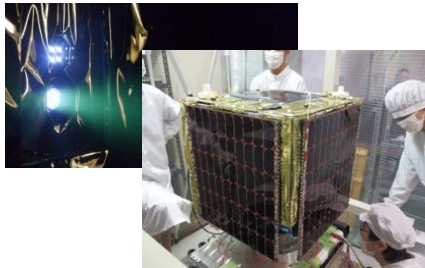
- 太陽系探査・衛星技術においては、「はやぶさ」シリーズから宇宙航行能力を向上させた次世代探査機にて、2020年代以降の小天体をはじめとする遠方探査をリードする。そのような航行技術は黄道面脱出など新規性のある視点からの太陽観測や天文観測も可能にするものである。その一方、小惑星以外の天体への日本独自の着陸は実現していないため、SLIM による月面へのピンポイント着陸を実施した後、火星等の重力天体への着陸技術の獲得と、木星・土星圏そしてより遠方の宇宙空間を目指した技術革新が、次世代の目標となる。



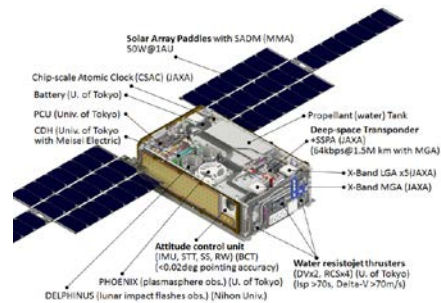
太陽系探査技術

- ポスト PROCYON 時代の超小型高機能探査機術を確立する。

超小型で高頻度な宇宙探査を常態化させることで、小型ならびに戦略的中型ミッションだけではカバーしきれないより多様な探査への挑戦を可能とするそのために超小型深宇宙探査機に適応した宇宙輸送系の進化も同時に進展する。高機能の小型宇宙機の実現により、太陽系科学・天文分野で重要となる編隊飛行にも道を拓く。



世界初の50kg級深宇宙探査機PROCYON



EQUULEUSで狙う 深宇宙CubeSatバス

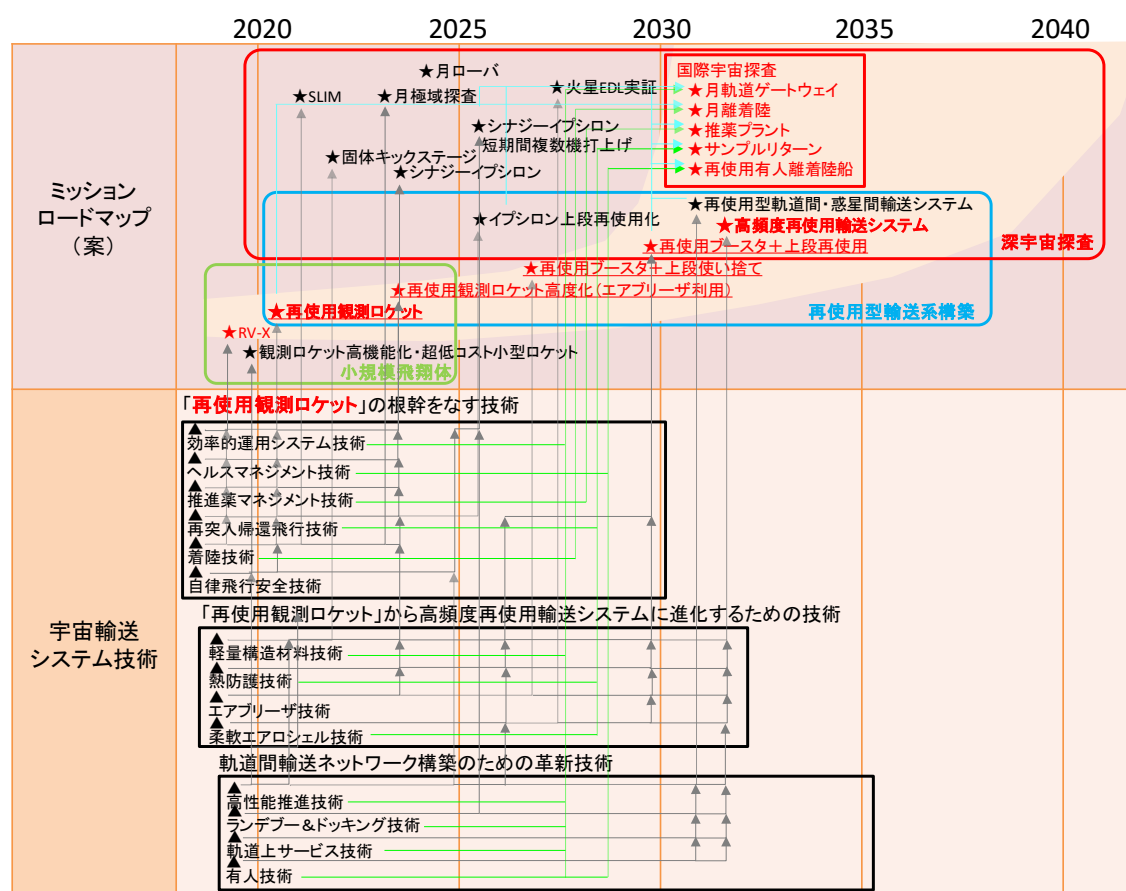
超小型探査機技術

東京大学等と ISAS が連携し、世界に先駆けて超小型衛星の活動領域を地球近傍から深宇宙空間へ拡大してきている。(右図: 50kg 級 PROCYON と 10kg 級の EQUULEUS)

以下には、工学の3分野において重要となる技術について抽出し、ロードマップとともに記載した。

(5)低コスト高頻度な宇宙輸送システム構築技術

イプシロンロケットの能力向上・低コスト化と、再使用型宇宙輸送システムの構築がキーとなる。前者は、カスタマイズ性など科学・探査用途のメリットを生かしつつ、キックモータを開発・利用するなどして、火星圏に一定の質量の探査機を打ち上げられる能力が求められる。さらには短期間での複数機打ち上げ／ドッキングや上段の再使用化により多様な科学ニーズに応えるための輸送技術の獲得も重要である。

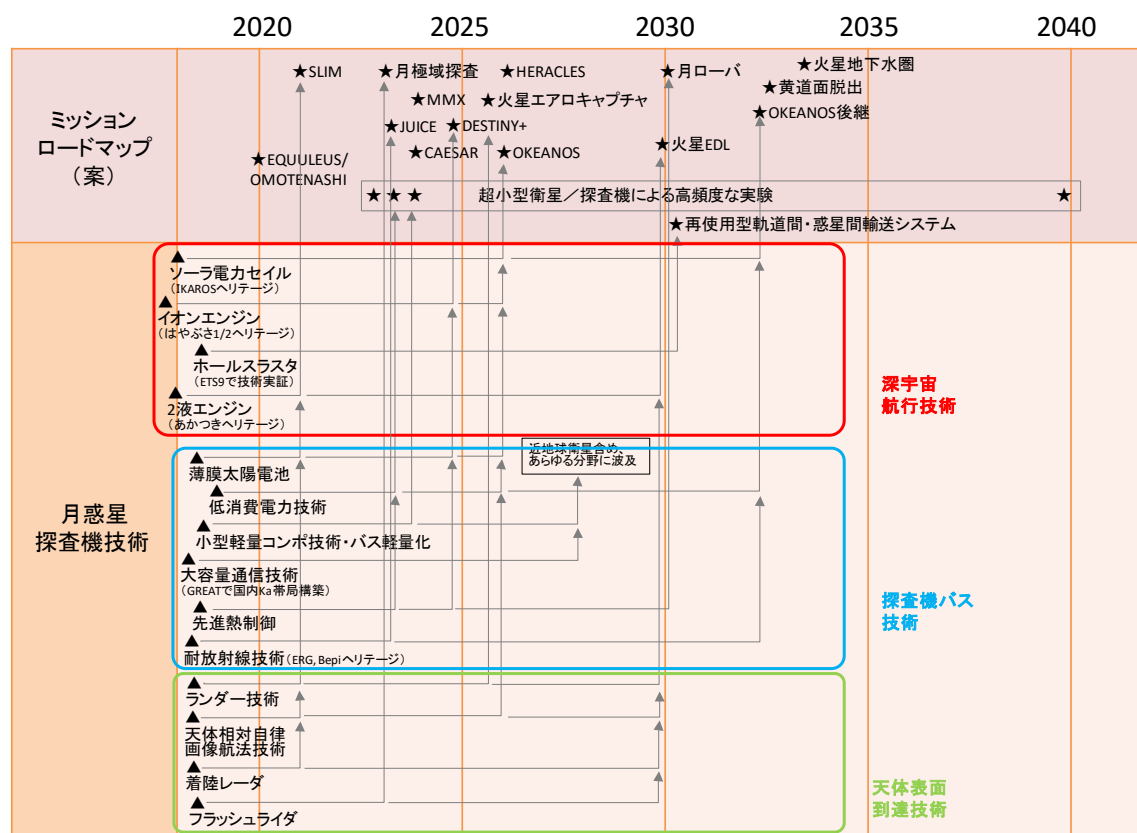


宇宙輸送システム技術のロードマップ

後者は、超軽量構造や再使用熱防護材など機体の再使用化技術のみならず、再使用のシステム・運用・マネジメント技術等、総合的な技術獲得が必要である。また、再使用システムのさらなる高性能化のため、エアブリージングエンジンやデトネーションエンジンなどの革新的な推進システムの開発も重要である。さらに多様な宇宙科学ミッションを可能とする軌道間輸送ネットワークの構築には再使用型の軌道間輸送システムの開発・運用が必要である。

(6) 深宇宙航行・探査機バス技術

外惑星領域に到達することを可能とし、太陽圏全域の自在な探査を実現する技術が必要である。黄道面脱出など太陽圏を俯瞰できる地点からの観測は、太陽圏全体の物理的理解を推し進めると共に、黄道面ダストに影響されない赤外線天文観測が可能となる。軌道間輸送技術の獲得は、探査ミッションの頻度と可能性を増大させるものである。また、バス系コンポーネントの小型軽量化等により比較的重量がある観測装置を目的地に持っていきことができるようになると、多様で高度な計測が実現しミッションの可能性が広がる。合わせて、望遠鏡など観測装置の軽量化も重要である。

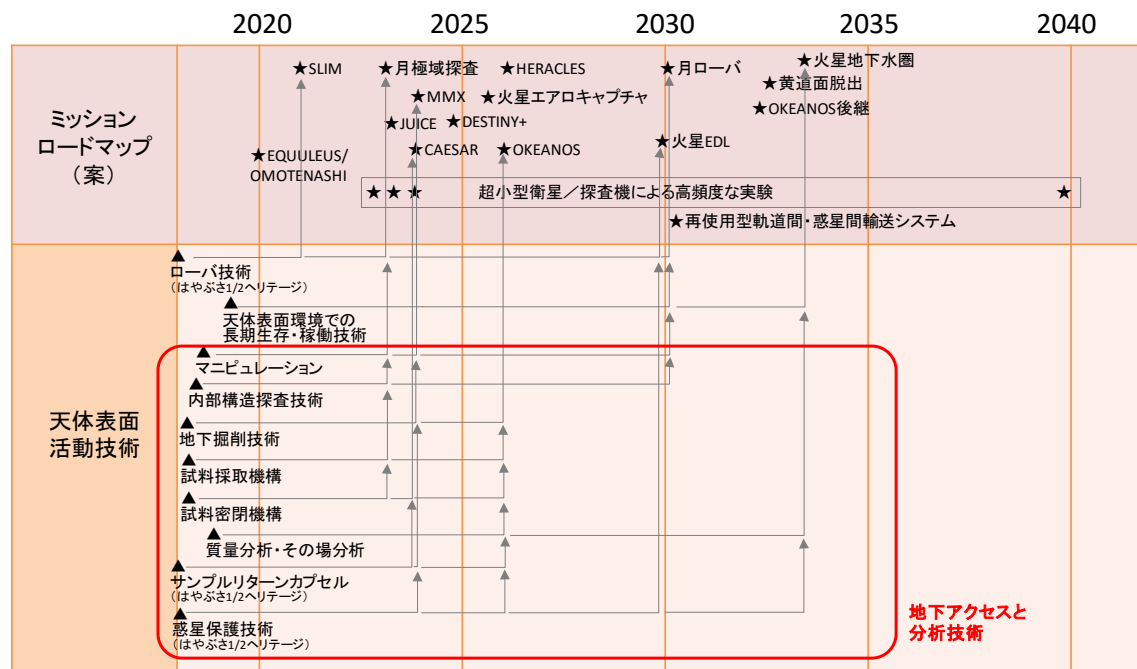


月惑星探査機技術の技術ロードマップ

より遠方の天体に到達するために宇宙航行能力を向上することが、多様な探査活動のために重要である。具体的には、OKEANOS で実現を目指すソーラ電力セイルや、イオンエンジンの高性能化（高比推力・高推力化）、ホールスラスタの深宇宙適用、二液化学推進系の高度化などに、高度な軌道決定をはじめとした地上技術を組み合わせた総合的な技術向上が必要である。さらに軽量大面積太陽電池パドル、高効率薄膜太陽電池、省電力などの電力技術の高度化が必要である。また、欧米に遅れをとっている通信容量の増大は、深宇宙探査のみならず観測衛星からの要求を含め、喫緊の課題である。

(7)天体表面到達技術

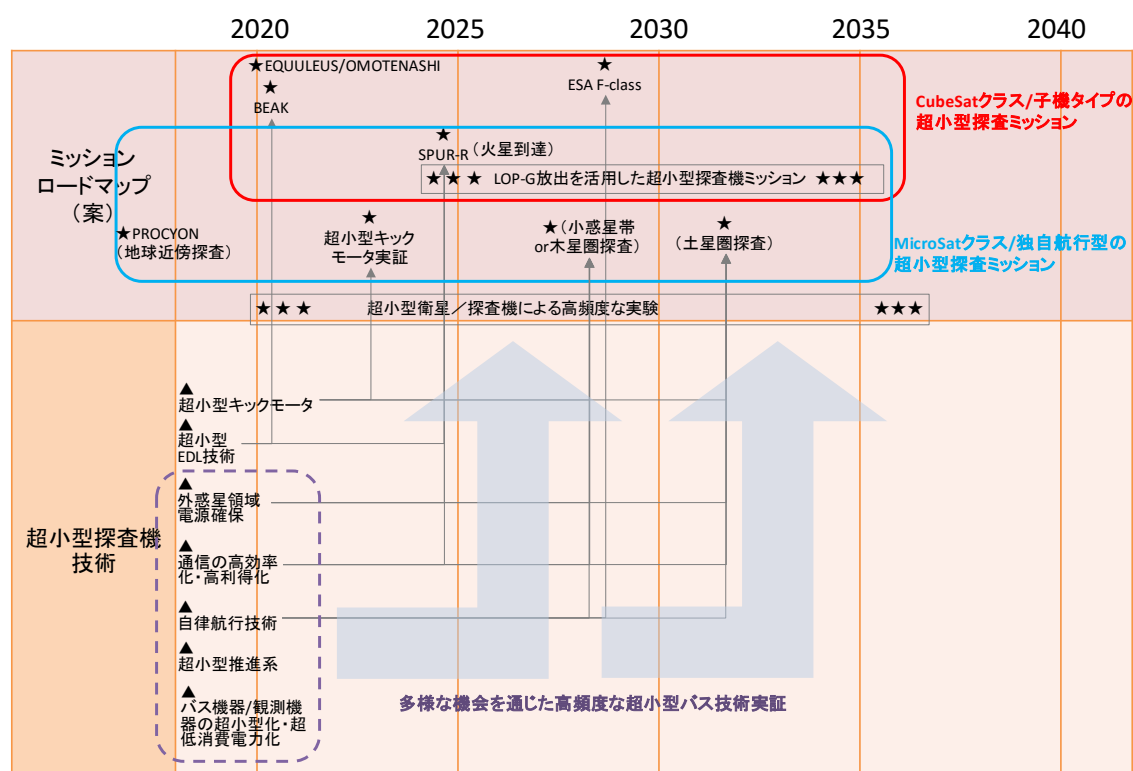
大気を持つ天体へ大質量をエントリさせる技術(エアロキャプチャや展開型エアロシェル等の先進的な手法も含む)に加え、SLIM で先鞭をつける高精度着陸を大気を持つ天体で行う技術を獲得する必要がある。さらに、天体表面環境での熱制御など長期生存・稼働技術と、天体上の各種の移動手段(長距離踏査ローバ等)による極限地形へのアクセス技術を獲得する必要がある。対象は月、小天体、火星、さらに遠方の天体である。火星においては、惑星保護技術も合わせて確立する必要がある。これらの技術を日本はまだ手にしておらず、2020年代後半に最初の EDL 実証を中型クラス以上で実現することがその後の本格火星探査のために重要である。



天体表面活動技術の技術ロードマップ

(8) 超小型探査機技術(観測機器の小型化を含む)

超小型衛星・探査機は、今後の宇宙科学において多様で萌芽的なミッションを短いサイクルで高頻度を実施するための有効なプラットフォームとして認識され、宇宙工学のみならず太陽系科学・天文分野においても多くのミッション構想がある。そこで宇宙工学としては、超小型衛星による本格的な深宇宙探査を目指して、より遠方領域の探査を実現するための広範囲なバス技術(電力確保、省電力技術、高効率通信、推進系、EDL、自動化自律化技術など)の獲得を目指す。超小型探査機技術の研究開発と実証にあたっては、地球周回での商業利用も含む多様な取り組みとの間で相乗効果を意識することが重要である。また、従来の探査機の小型軽量化、省エネ化(省電力化、耐低温化、高効率発電など)の方向性とも連携しながら成果を挙げていくことも求められる。編隊飛行 STP ミッションのための観測装置の小型化など、超小型衛星を科学観測に活用するための理学機器の革新も合わせて行う必要がある。



超小型探査機技術の技術ロードマップ

3. 3 太陽系科学(太陽系探査・太陽圏科学)

太陽系科学分野において我が国が20年後以降に世界に伍した成果を出し続けるためには、理学の科学目標と工学の挑戦課題が合致する以下の三つのパスを長期的に追求することが有効と考える。

- 「より自在に」～地下探査と重力天体着陸技術

重力天体の着陸探査、将来的には地下探査を行う。例えば2030年代までの月着陸探査技術を開発させ、さらに EDL(大気圏突入・降下・着陸)や惑星保護の技術を獲得することにより、火星の高緯度の地下凍土層や急斜面の地層の探査を行う。MMX により火星周回軌道への輸送が実現することからの発展でもある。

- 「より遠くに」～外惑星領域の探査と遠方航行技術

OKEANOS を皮切りに、スノーライン以遠に2030年代までに独自技術で到達する。小天体からのサンプリングや電気推進による遠方航行技術といった日本の強みを伸ばしつつ、国際ミッションへの超小型宇宙機や観測機器の提供も含めて、木星トロヤ群などスノーライン以遠の始原天体や木星・土星圏の探査を実現する。

- 「太陽・惑星圏」～太陽から惑星への結合の多角的観測と編隊飛行・黄道面脱出

小型衛星による多角的な太陽観測に加え、上記の遠方航行技術の活用により黄道面脱出など地球から離れた特徴的な視点からの太陽観測を行う。また超小型衛星の活用と観測機器の小型化により、磁気圏や惑星間空間の多点同時編隊飛行ネットワーク観測を実現する。

「より自在に」パスの要は重力天体着陸技術の獲得である。月着陸に関しては SLIM により技術実証がなされるが、その後の科学探査のためにはローバや越夜などの技術獲得が必要であり、中・大型ミッションのプログラムの実施が必須である。火星着陸には空力制御や惑星保護など、月にはない技術的ジャンプがあり、月面で実績を積むだけでは火星表面には到達できない。火星サンプルリターンをマイルストーンとする欧米の火星探査に遅れをとらずに2030年代に独自の科学探査を実現するには、2020年代後半に EDL 実証を実現し、続けてローバを含むアクセス困難地域への着陸探査をプログラムの実証する必要がある。来る有人火星探査時代においても、アクセスが困難な地域の科学探査は人類活動の拡大や生命の起源という根源的な問いへの回答として世界に資するものである。

一方、「より遠くに」パスは先端的な工学実験とセットで未踏天体探査を中核として進めるものであり、宇宙研を主体としたこれまでのような理工連携体制を基本とすることが有効と考えられる。はやぶさ・はやぶさ2・IKAROS・DESTINY+の実績をもとに、これまでの強みをさらに伸ばすという意味でも、宇宙研がここに注力するのは合理的である。ソーラー電力セイルを2020年代半ばに実現し、その実績をもとに、より挑戦的な外惑星領域の探査を2030年代に実現する。このパスの追求で獲得される技術群(高比推力、長寿命、遠距離高速通信・軌道決定、低温動作など)は、スノーライン以遠の探査のみならず、太陽系全域の多様な環境探査と、さらに将来の恒星間探査の創造においても基盤となるものである。

「太陽・惑星圏」パスにおいては、2020年代半ばに本格観測開始が予定される BepiColombo/みお、Parker Solar Probe、Solar Orbiter と相乗効果が大い太陽分光や太陽磁場観測を小型衛星で実現し、太陽圏内部領域(太陽表面～水星～地球)の多角的な探査を進める。さらに観測機器の小型化・軽量化を進め、2030年代には、JUICE が先鞭をつける外惑星の電磁気圏探査、ジオスペースや惑星間空間の多点同時編隊飛行ネットワーク観測、黄道面脱出など地球から離れた特徴的な視点からの太陽観測など、研究の範囲を太陽内部から外惑星まで太陽圏全域に広げる。さらには、X線による磁気圏可視化等の新しい観測手段の実用化も進めていく。また、粒子加速などプラズマ物理現象の素過程に関する直接的な観測も、遠くの日体現象の理解にも寄与するものである。

探査のための重要技術については、3.2宇宙工学で抽出した「深宇宙航行・探査機バス技術」や「天体表面到達技術」等が理工学で共通する重要技術であり、理工で共通する重要技術として宇宙工学の節でまとめて示した。以下は地下アクセスと分析技術について記載した。

(9)地下アクセスと分析技術

地下を掘削する技術として、はやぶさ2の SCI や MMX で開発中の円筒コアサンブラがあるが、さらに重力天体でも適用可能な手法として土木・建築で用いられるようなスクリーやドリルを月・惑星環境へ対応させるための改良、あるいは NASA Insight 火星着陸機に搭載されたモグラ型地下プローブや OKEANOS に向けて開発されたガス噴出型掘削装置など、新しい掘削技術のタイムリーな育成が大切である。

試料採取機構としては、小天体に適した弾丸射出やガス噴出による採取を進化させるとともに、重力天体に適したマニピュレータに各天体表面環境にカスタマイズしたエンドエフェクタを搭載した装置の新規開発が必要であろう。

その場分析技術としては、OKEANOS 着陸機で開発中の高質量分解能質量分析や将来の火星着陸探査や海洋天体探査を想定した生命活動兆候検出技術、有機分子のウェット化学分析技術などが重要である。外惑星領域の探査に向けては、内部海ブリュームなど微粒子の非破壊採取技術と、探査機内部で捕集試料を化学分析するための試料ハンドリング・試料準備技術などの確立も求められる。上記のような生命探査を軸としたアストロバイオロジー研究を可能とする往復路の惑星保護技術(バイオバーデン技術、揮発成分の真空低温保存、汚染管理技術)の確立も必須である。

3. 4 戦略的に獲得すべき宇宙科学技術リスト

前節までで抽出された戦略的に開発すべき技術の一覧を以下に示す。

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(1) 宇宙用冷凍機技術の高性能化					
100K-20K冷凍機の大 型化 ・PT冷凍機など新 たな宇宙用冷凍機 の開発	天文学・地球 観測等	B	2030年代初め	200mW@20Kは軌道実証済 み、1W級への拡大はまだ 始まっていない。	1段スターリング冷凍機、2段ス ターリング冷凍機については、あか り、ASTRO-Hなどの実績があり、 TRLは8に達しているが、これらは 冷凍効率が高いものの冷凍能力の 絶対値は0.2W@16K程度である。 一方で米国がPlankで使用したH2 ソーブションは1W@20Kを達成し た。(ただし使用電力も5倍) 今 後大面積の集光鏡を冷却するな ど、冷却効率だけではない応用が 生まれる可能性もあり、長期的に みて開発は望ましい。
4K-1K級冷凍機の性能 向上 ・4K/1Kジュールトム ソン冷凍機	天文学・地球 観測等	B	2020年代初め	TRL8 (4K) TRL5 (1K)	4KJTはAstro-Hに搭載され、駆動 が確認された。1K級冷凍機につい ては、Athena/SPICA/LiteBIRDで の使用が予想され、近々に実証が 必要である。ただし、運転の自動 化など制御系はまだ改善の余 地があるものと思われる。
100mK級冷凍機の開発 ・ADR/希釈冷凍機な どの開発	天文学	B	2020年代半ば	4KJTはAstro-Hに搭載さ れ、駆動が確認された。 1K級冷凍機については、 Athena/SPICA/LiteBIRDで の使用が予想され、近々 に実証が必要である。た だし、運転の自動化など 制御系はまだ改善の 余地があるものと思われ る。	100mK以下の冷凍機に関して、日 本製で軌道実証されたものはな い。米国製のADRがAstro-Hなど で利用され、LiteBIRDでも搭載予 定である。ADRには、一定時間ご とにリサイクルが必要で、連続観測 ができないという難点があり、 LiteBIRDあるいは将来のスクラン 観測衛星のために連続観測が可能 な希釈冷凍機等の技術開発を行な うことが必要である。JAXAでは研 究本部が機械式冷凍機の圧縮機を 利用し、フランスと共同で実験室 レベルの実証を行なっている。

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(2) 軽量光学系技術					
可視・近赤外線望遠鏡 ・低熱膨張セラミック鏡	天文学・惑星科学	B	2020年代中盤	TRL3、ただしSiC鏡はTRL8	SiCをはじめとする低熱膨張セラミック材は、熱伝導性や剛性、宇宙放射線耐性などにも優れており、とくに熱安定性が求められる宇宙用軽量望遠鏡の材料として優れている。「あかり」望遠鏡の主鏡・副鏡（温度6 K、波長5ミクロン回折限界）は世界で初めての宇宙冷却SiC鏡であった。他の実績として、Herschel（80 K、遠赤外線）、GAIA（位置天文、可視）、「あすなろ」（地球観測）などがある。SiCは硬く加工が容易でない欠点があるが、近年は加工性を高めた新しい低熱膨張セラミック材が開発され、宇宙観測用の鏡に適用されつつある。
中遠赤外線望遠鏡 ・CFRP(炭素繊維強化プラスチック)鏡	天文学・惑星科学	A, B	2020年代中盤	TRL3、ただしサブミリ波帯望遠鏡としてはTRL8	CFRPは熱安定性（熱伝導率/線熱膨張係数）と比剛性（ヤング率/比重）の両方で非常に優れており、fracture toughnessも非常に高いため、衛星搭載用の高信頼度な極低温軽量大型ミラーとして大変、魅力的な素材である。Planck衛星で採用された実績がある。ただし、炭素繊維が存在するため、良質な鏡面を得ることが困難である。電波・サブミリ波帯望遠鏡としては問題ないが、短い波長に適用するためには、鏡面形成法の開発が必要である。
X線望遠鏡 (1) MEMS方式超軽量望遠鏡 (2) Si高温塑性変形鏡 (3) CFRP望遠鏡	天文学・惑星科学	A, B	2020年代中盤	TRL3	日本のX線天文衛星の望遠鏡として採用されてきた、多重薄板型Alフォイル軽量ミラーに代わる次世代の技術として、いずれも日本発の技術である。(1) 薄いSi基板に数十ミクロン程度の微細孔をあけ、その側壁を平滑化して反射鏡として用いる。Si基板を球面に曲げて、2段に重ねる。(2) Si高温塑性変形技術を用いて、Wolter-I型望遠鏡の放物面・双曲面をSi基板で実現する（従来のAlフォイルでは円錐近似であった）。(3) 放物面・双曲面一体型をCFRP基板で実現する。(1)は超小型衛星に搭載する超軽量X線望遠鏡として、(2)はsuper-DIOS、(3)はFORCEに向けて開発が進められている。
太陽観測用の光学望遠鏡の超軽量・小型化 ・80cm-1mクラスをイブシロンに搭載可能に ・超軽量化ミラーや精密支持構造の軽量化	太陽物理学、天文学全般	A, B	2030年代初め	TRL2（アイデア検討段階）	ひので搭載50cm口径光学望遠鏡（ガラス鏡、CFRPトラス構造）は重量103kgで軌道上実績がある（2007年）。SOLAR-C 1m口径光学望遠鏡の概念設計（ひので設計思想を基本的に踏襲）の結果として重量は500 kgとなる（2015年）。光学系の革新的な精密支持やミラーの超軽量化（CFRP鏡の適用も含む）など、重量の半減（200-250kg 目標）が重要である。なお、入熱環境が厳しい太陽観測用の光学望遠鏡は、低温の宇宙赤外線望遠鏡と同様に、過酷な熱環境のもと光学安定性が求められるため、両技術の関連性は強い。

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(3) 編隊飛行技術 (フォーメーションフライト)					
測距技術	赤外干渉計	A	2020年代後半	TRL3-4	赤外線干渉計では、輝線長として1km(遠赤外線), 10-100m(近・中間赤外線)を想定し、その距離を100mm(遠赤外線), 1-10mm(近赤外線)と、 10^{-4} の精度で測定する必要がある。 ETS-VIIのランデブレーザは数10mの距離域で10cm程度、数100mの距離域で数10cm程度の測距精度であったので、これを1桁から2桁高精度化する必要がある。
測角技術	赤外干渉計	A	2020年代後半	TRL3-4	赤外線干渉計では、基線長として1km(遠赤外線), 10-100m(近・中間赤外線)を想定し、その位置を100mm(遠赤外線), 近赤外線(1-10mm)と、 10^{-4} の精度で測定する必要がある。 ETS-VIIのランデブレーザは数100m以近で 0.05deg (10^{-3} rad) 程度の測距精度であったので、これを1桁程度高精度化する必要がある。
精密協調制御技術	重力波干渉計	A	2030年代?	TRL3	重力波干渉計では、基線長として1000km(B-DECIGO), 10000km(DECIGO)が想定されている。衛星間のフォーメーションフライト制御系(粗制御系)は、レーザ干渉計を干渉可能範囲に保ちつつ、ブルーフマスを可動範囲(0.1mm)内に保つようにレーザ干渉計制御系(精制御系)と協調制御を行う必要がある。
低擾乱制御技術	重力波干渉計	A	2030年代?	TRL2	重力波干渉計では、基線長として1000km(B-DECIGO), 10000km(DECIGO)が想定されている。距離の絶対精度は基線長の1/100程度だが、0.1-10 Hzでの重力波を捉えるためには、そのゆらぎスペクトルが $1\text{E-}18 \text{ m/sqrt(Hz)}$ 程度である必要がある。
編隊飛行する多数の宇宙機の運用技術	地球磁気圏STP	A	2020年代初め	TRL4	多数の宇宙機間で相互に通信し、相対位置を計測し、宇宙機の健康状態を相互監視して、一部に異常が発生した場合には正常な宇宙機が安全に退避し、編隊を再構成する技術が必要となる。ETS-VIIでは2機の宇宙機間で相互通信、相対航法、安全監視と自動退避技術を実証した。複数宇宙機間の通信および測距技術は、準天頂衛星システムで7基の衛星間で研究開発を行っている。

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(4) 干渉計技術					
中遠赤外干渉計検出技術 ・光路差をコヒーレント長レベルで安定させる光学系 ・安定化レーザーを含むヘテロダイン検波技術	赤外干渉計	A	2020年代後半	TRL3	気球実験FITEは、飛翔実験には至らなかったものの、2つのビームの焦点を一致させ、かつ光路差をコヒーレント長内にすることが可能な光学系を完成させた。
超高精度宇宙レーザー干渉技術	重力波干渉計	A	2020年代後半	TRL4-5 基本的な技術は既に獲得済み。宇宙への応用技術については現在開発中。	光共振器を用いたレーザー干渉計を制御し超高感度を実現する技術そのものは、地上の大型重力波検出器であるKAGRA等により既に獲得されている。ただし、地上検出器はアーム長が数kmであるのに対し、宇宙検出器は100km(B-DECIGO)～1000km(DECIGO)である点、そして、鏡の変位雑音に関しては地上検出器は周波数帯が10Hz～10kHzであるのに対し、宇宙検出器は0.1～10Hzである点において違いがあるため、それをカバーする技術を開発中である。
大容量データ伝送 (近地球やL1/2点の科学ミッションのKaバンド使用)	赤外天文学、太陽物理学、X線天文学など	A	2020年代半ば (まずはWFIRST)	右欄参照	追跡ネットワーク分科会にて、JAXA追跡ネットワークの整備構想が検討されており(2017.7)、まず地球観測データダウンリンクのX帯→Ka帯化の為に地上局の整備が始まっている。また、科学衛星向けのKa帯対応化も構想として考えられ始めている。海外(NASA)では、2020年代の科学ミッションはKa帯が標準。またスペクトラム拡散通信のロングコードの使用などによる高信頼性、高データレート通信技術の開発も検討に値する。

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(5) 低コスト高頻度な宇宙輸送システム構築技術					
イプシロンロケットの能力向上・低コスト化	太陽系探査 地球周回観測 ミッション	B, D	2020年代初め	TRL3-5	これまでの固体ロケットモータ開発技術を用いて小型キックモータを開発し打ち上げ能力を向上する。H3ロケットとの構成要素を共有化し低コスト化を図る。また上段再使用化によるさらなる低コスト化を図る。
システム設計技術 (最適化/高信頼化/寿命管理等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 大気観測・サンプリング	C, D	2020年代初め	TRL3-5	再使用実験機、再使用観測ロケットなどの機体システムを設計・開発し、それらによるシステムレベルでの実証を行う
運用効率化技術 (システム知能化/自律化等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 大気観測・サンプリング	D	2020年代初め	TRL3-5	再使用実験機、再使用観測ロケットなどによるシステムレベルでの繰り返し運用実証を行う
ヘルスマネジメント技術 (先進搭載センサ/ワイヤレスネットワーク等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 大気観測・サンプリング	B, D	2020年代初め	TRL3-5	要素レベルでの研究開発とともに、再使用実験機、再使用観測ロケットなどによるシステムレベルでの飛行実証を行う
推進薬マネジメント技術 (貯蔵/輸送/予冷/ボイルオフ等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 太陽系探査工学ミッション	D	2020年代初め～半ば	TRL3-4	要素レベルでの研究開発とともに、観測ロケットを用いた飛行実証や実験機などによるシステムレベルでの飛行実証を行う。また軌道上実験 (基幹ロケット残推進薬実験)、数値シミュレーション高度化、微小重力実験 (解析検証) による実証を行う。
機体構造超軽量化	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション	B, D	2020年代半ば	TRL3-4	地上構造試験、地上真空熱環境試験、飛行実証
軽量再使用熱防護材	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 大気観測・サンプリング	D	2020年代半ば	TRL3-4	要素レベルでの研究開発とともに、再使用実験機、再使用観測ロケットなどによるシステムレベルでの飛行実証を行う 地上高エンタルピ風洞試験、地上真空熱環境試験、飛行実証
突入/帰還飛行最適誘導制御技術	大気観測・サンプリング 太陽系探査工学ミッション	D	2020年代半ば	TRL3-4	再使用実験機、再使用観測ロケットなどによるシステムレベルでの飛行実証を行う
空力制御技術 (フラス・マアクチューエータ/モーフィング等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 大気観測・サンプリング 惑星大気飛行ミッション	D	2020年代半ば	TRL3-4	要素レベルでの研究開発とともに、実験機によるシステムレベルでの飛行実証を行う
高性能推進技術 (デトネーションエンジン、エアロスパイクエンジン等)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 太陽系探査工学ミッション	B, D	2020年代半ば	TRL3-4	要素レベルでの研究開発とともに、観測ロケットを用いた飛行実証や実験機などによるシステムレベルでの飛行実証を行う

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(6) 深宇宙航行・黄道面脱出に必要な技術					
軌道間輸送技術(ドッキング/再補給/推進薬合成)	低コスト高頻度宇宙輸送を必要とする将来ミッション 太陽系探査	B, C, D	2020年代後半	TRL3	極低温推進薬長期保存技術研究(戦略研究) H-IIA上段高度化、HTV 技術試験衛星(ETS7) ※今後、要素レベルでの研究開発とともに、再使用観測ロケットや基幹ロケットを用いた宇宙環境での技術実証、実験機などによるシステムレベルでの飛行実証を行う
ソーラー電力セイル	太陽系探査	A, B	2020年代初め	TRL4 (OKEANOS)	IKAROSで14x14mのセイルを軌道上実証 OKEANOSで40x40mのセイルを開発中
イオンエンジンの高性能化(高比推力・高推力化)	太陽系探査	B	2020年代初め	TRL3-4 (DESTINY+)	DESTINY+ではやぶさ2の2倍の航行能力を獲得
ホールスラスターの深宇宙適用	太陽系探査	B, C, D	2020年代中頃	TRL4	ETS9向けホールスラスタを開発中
二液推進系エンジン	太陽系探査	B, C, D	2020年代初め	TRL5 (SLIM)	あかつき、SLIMでセラミックスラスタを実証 さらに軽量・大型・高性能化を目的としたセラミック/金属接合スラスタを研究開発(戦略研究)
大電力薄膜太陽電池	太陽系探査	B, C, D	2010年代後半	TRL4-7	以下のように、R&Dの結果を軌道上実証しつつ、ミッションの特色に合わせて投入 SPRINT-A/NESSIE (軌道上実証) HTV#6/SFINKS (軌道上実証) SLIM (ボディマウント) DESTINY+ (大面積パドル) OKEANOS (電力セイル)
低消費電力技術	太陽系探査	B, D	2020年代初め～中頃	TRL3-4	ヒータ電力の削減の観点から、低温動作バッテリーについて車載セルの評価を宇宙科学技術プログラム委員会の枠組みで実施。非凍結型低温2液推進系はソーラーセイルWGで研究
小型軽量コンポーネント技術	太陽系探査 地球周回小型ミッション	B, D	2020年代初め～中頃	TRL3-4	一筐体・多機能コンポーネントや、MEMSによるワンチップ化や高密度実装を用いた小型軽量化、ドライバや電力供給部(PSU)の高効率化の試作などの研究開発を実施中(戦略研究)
大容量通信技術	太陽系探査 太陽物理学 地球周回観測 ミッション	A, B, D	2020年代初め～2030年代初め	Ka帯導入 (はやぶさ2) ターボ符号導入 (MMO)	1. 周波数帯 X帯⇒Ka帯 (GREAT54m) 2. 多値変調化 QPSK⇒8PSK⇒64APSK 3. 高能率符号化 (ターボ符号、LDPC符号化) 4. 衛星間光通信 NASA実績: Parker Solar Probe (0.6 m HGA, 34W TWTA Ka-band, 167kbps at 1AU distance) から、10年後にあるべき伝送速度としては0.5Mbps/sec@1AU 程度の数字が挙げられる。
宇宙機バスの革新的な軽量化 (例: 現在の標準小型バス250kgを150kg級に、イプシロン余剰能力をミッション部に)	あらゆる分野		2020年代半ば	現在の標準小型バスは250kg級。バス機器の中には軽量小型の機器の開発が進んでいるものもあるが、組織的な検討は行われていない。	NASA SMEXにおいては、衛星バスが150kg級で実施されており、搭載できるミッション機器に自由度が多い。

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(7) 天体表面到達技術					
天体相対自律画像航法技術	太陽系探査	A, B	2020年代初め	TRL4 (SLIM)	着陸天体によらず共通な技術要素と天体ごとに特化した技術が存在 SLIM (月) MMX (フォボス)
着陸用航法センサ	太陽系探査	A, B, C	2020年代初め	TRL4 (フラッシュライダ)	フラッシュライダはALL JAXAの課題として設定され、ISASのチームによる開発により、HTV-Xの搭載が検討されている。 着陸レーダは2000年代半ばからISASで開発され、SLIMに搭載される。その先、さらなる高精度化に向け、キャリア周波数の高周波化などが望まれる。
ランダー技術 (極限地形へのアクセスを含む)	太陽系探査	A, C	2020年代初め	TRL4 (SLIM)	SLIMで月面へのピンポイント着陸 (斜面) を実証。火星に向けては、大気を有する重力天体特有の技術課題に取り組む必要あり (エアロキャブチャ等を含む)。展開型エアロシェルによるナノランダーミッションはSPURとして提案された。
ローバー技術	太陽系探査	A, B	2020年代初め	TRL8-9 (MINERVA-2) TRL4 (SLIM LEV)	対象天体に合わせて移動機構等を最適化 はやぶさシリーズのMINERVA SLIM搭載予定の小型プローブ (LEV)
先進熱制御技術	太陽系探査	B, C, D	2020年代初め	TRL3-4	二相流体ポンプシステムやマルチエバポレータ型LHPなどによる能動的、あるいは高機能 (熱スイッチなど) な熱制御技術のBBMレベルの部分試作が進められている (戦略研究)
天体表面環境での長期生存・稼働技術	月探査・火星探査	A, B	2030年代初め	TRL3	月面越夜技術について、SELENE-2ブリプロの活動で、ローバー、ミッション機器、バスの熱モデルの試作による保温性能の評価、及びセルの試作による超高エネルギー密度の越夜用リチウムイオン電池の評価を実施

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(8) 超小型探査機技術 (観測機器の小型化を含む)					
外惑星領域で使用可能な電力確保技術	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代後半	超小型衛星向けブーム展開型セイル実証予定 (Origamisat, 2019)	軽量大面積太陽電池パドル、高効率薄膜太陽電池、ソーラー電力セイルなど。工学委員会研究でいくつかカバー。ただし、超小型探査機に適用可能な形では、Origamisat のブーム展開型セイル(2019実証予定)のみ？
超小型・低消費電力計算機	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代中盤	CubeSat向け1W級OBCは開発済み (打ち上げ待ち)	CubeSat向け1W級OBCをEQUULEUSで開発。2019以降実証予定。性能はさほど落とさずに、さらなる低消費電力化を図り、土星以遠の超小型探査に備えたい。
超小型・大電力・高効率電力増幅器	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代前半	50kg級衛星向けは軌道上実証済み。 CubeSat級 (12U, 24U-class含めて) への展開に早く取り組むべき。	PROCYON, ほどよし等の50kg級衛星でGaAnプンプ実証済み(2014) CubeSat級 (12U, 24U-class含めて) への展開 (超小型化) が必要。EQUULEUS・OMOTENASHIでは「大電力」は目指していないので、新たな開発・実証の場が必要。
超小型衛星用高利得アンテナ	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代後半	50kg級衛星のための50cm級HGAは開発・打ち上げ済みだが、軌道上未実証。CubeSat級は (利得はそこまで稼げないが) JPLが展開型HGA軌道上実証済み。	50kg級衛星のための50cm級HGAはPROCYON向けに開発済みだが、軌道上での作動機会がなく未実証。どこかで実証機会が必要。将来的には、薄膜小型Phased Array Antenna等を開発して、姿勢運用制約なく高レート通信を可能にするアンテナ技術が欲しい。
超小型衛星用高推力推進系	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代前半	BBM実験段階	水を推進剤とした統合推進系が、BBM実験段階。一部 (水レジストジェット) は2019年以降実証予定でFM開発中。
超小型キックモータ	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代前半	BBM/EM実験段階	観測ロケット/低軌道/GTO等で段階的に実証する。Storableな酸化剤を適用したハイブリッドロケットを想定。2021年GTO相乗りを目指してBBM/EM実験段階@北大
超小型EDL技術	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代前半	サブスケールの軌道上実証を経てミッション提案段階	EGG (2017)でサブスケールの柔軟エアロシェルの展開・再突入実験に成功 火星EDLへ適用し実証を計画 (SPUR)
地上局との更新頻度を極端に減らす自律航行技術	超小型探査機による本格太陽系探査	A, B	2020年代後半	具体的なミッションを想定した取り組みはない	超小型探査機の運用スタイルは、まだ小型中型探査機と同じスタイルを踏襲している。超小型探査機の運用コストを低減し、多数機・高頻度な探査を実現するためには、自律管制・自律軌道決定・自律軌道制御の実現に向けた研究は極めて重要だが、戦略的に研究がされているとは言えない。軌道決定に関しては、原理レベルの基礎研究段階 (LiAISON, ASST) or X線パルサー航法は超小型向けではないがISSで原理検証はされた。また、衛星間測距+小Δによる複数探査機による自律軌道決定技術も研究には着手されている (東京大学)。
観測装置の小型・軽量化 (例: 編隊飛行STPミッションに搭載のその場観測装置)	地球磁気圏STP	A, B	2025年後半	波動: TRL 5-6 粒子: TRL 2-3	波動: 京都大学、金沢大学において、受信器部、プリアンプ部のASICチップの開発が行われている。アナログチップは、SS-520-3ロケット実験に搭載されるLFASに組み込まれており、宇宙実証実験の準備が整っている。 粒子: 宇宙研において超小型エネルギー分析部のBBMレベルの検討・開発が行われている。

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(9) 地下アクセスと分析技術					
マニピュレーション	太陽系探査	B, C, D	2020年代中頃	TRL3-4	SELENE-2 2m級マニピュレータ MMXサンブラ、など
内部構造の物理探査技術	月探査・火星探査・外惑星領域探査	A	(1) 2020年代初め (2) 2030年代初め	(1) 地震計・熱流量計：月面についてはTRL8、その他天体への汎用技術は2018年段階でTRL5-6 (2) レーダーサウンダ：TRL3	(1) 地震計・熱流量計：Lunar-AプロジェクトにおけるFM製作、Selene-2、APPROACH構想における研究開発 (2) レーダーサウンダ：マルコポーロ提案（～2010年）、MMX計画（2016年～）における地下物理探査装置の宇宙応用にむけた改修・研究開発
地下掘削技術（重力天体） (1) 着陸後のロボットアーム先端設置の円筒コアサンブラ押しつけによるレゴリス掘削 (2) 火星のアクセス困難地域での地下試料掘削	月・火星着陸探査	A	(1) 2020年代初め (2) 2030年代初め	(1) MMXで円筒コアサンブラ開発中（2018年段階でTRL3） (2) 従来の土木・建築で用いられるスクリュー、アースオーガの他、新規的な掘削技術（ミミズ方式）も検討・開発されている。	(1) MMX円筒コアレゴリス掘削実験（2016年～） (2) 一部はJAXAイノベーションハブでの研究課題により開発が進められている。
地下掘削技術（微小重力天体） (1) ランデブー後のSCI衝突による人工クレーター形成 (2) 着陸後のガス噴射によるレゴリス層掘削	外惑星領域探査	A	2020年代初め	(1) はやぶさ2で宇宙実証（2019年でTRL9） (2) OKEANOSでニューマチックドリル開発中（2018年段階でTRL5）	(1) はやぶさ2 EM地上衝突実験（～2012年） (2) OKEANOS着陸機サンブラーBBM真空模擬レゴリス掘削試験（～2018年）
試料採取機構（重力天体）	月・火星着陸探査	A	2020年代初め	SELENE-R/ヘラクレスに向けて開発中	
試料採取機構（微小重力天体） (1) 弾丸射出&スクープ&ガス噴射型のタッチ&ゴー着陸試料採取 (2) 超高速～低速衝突微粒子の非破壊捕集採取	外惑星領域探査	A	(1) 2020年代初め (2) 2020年代初め	(1) 弾丸射出&スクープ型ははやぶさ2で宇宙実証（2018年でTRL9）、ガス噴射型はOKEANOS着陸機で開発中（2018年段階TRL5）、(2) 超高速衝突微粒子はたんばぼで宇宙実証（2016年でTRL9）、低速衝突微粒子はCORSAIR彗星核SR計画でBBM開発（2018年段階でTRL3）	(1) 弾丸射出&スクープ型：はやぶさ、はやぶさ2 FM開発（～2001年、～2013年）、OKEANOS着陸機弾丸射出サンブラBBM開発実験（～2017年）、ガス噴射型：OKEANOS着陸機ガス噴射型サンブラBBM開発実験（～2017年） (2) 超高速衝突微粒子：たんばぼFM開発（～2013年）、海洋天体ブリューム微粒子サンブラBBM開発実験（2015年～）、低速衝突微粒子：CORSAIR-Coma Dust Sampler BBM開発（2013～2018年）
試料密閉機構（重力天体）	月・火星着陸探査	A	2020年代初め	SELENE-R/ヘラクレスに向けて開発中	
試料密閉機構（微小重力天体） (1) 試料から高温分離・再吸着したガス成分の密閉容器 (2) 有機物汚染防止・惑星保護対策のための密閉容器&密閉分析インターフェイス (3) 揮発成分の真空低温保存のための密閉容器	外惑星領域探査	A	(1) 2020年代半ば (2) 2020年代後半	(1) はやぶさ2サンブラでFM宇宙実証（2020年でTRL9） (2) OKEANOS着陸機サンブラ用試料密閉容器BBM（2018年段階でTRL4）&海洋天体ブリューム微粒子用密閉分析容器BBMを開発中（2018年段階でTRL2） (3) 米CEASER用地球帰還カプセルBBMを開発中（2018年段階でTRL3）	(1) はやぶさ2 FM開発（～2013年） (2) OKEANOS着陸機サンブラBBM試料採取地上実験（2015年～）、海洋天体ブリューム微粒子サンブラBBM開発実験（2018年～） (3) CEASERカプセルプロトタイプ風洞実験・野外実験（2017年～）

要素技術	必要となる分野	必要根拠	開発完了 (TRL>6) となつてほしい時期	開発・実証ステータス (TRLなど)	左記の根拠となる実験・実証事例と実証された時期
(9) 地下アクセスと分析技術					
質量分析等その場物質分析技術 (1) 揮発性物質・有機物用のその場高質量分解能質量分析装置 (2) 生命活動兆候検出用のその場観測装置 (3) 生命検出用の蛍光顕微鏡。	月・火星着陸探査・外惑星領域探査	A	(1) 2020年代初め (2) 2020年代半ば (3) 2020年代後半	(1) OKEANOS着陸機でその場分析用MULTUM質量分析装置BBMを開発中 (2018年段階でTRL4) (2) 海洋天体ブリューム微粒子サンブラと軌道上分析装置BBMを開発中 (2018年段階でTRL3) (3) 火星着陸探査用生命検出顕微鏡 (LDM) BBMを開発中 (2018年段階でTRL4)	(1) OKEANOS着陸機用MULTUM-BBM試料採取&分析実験 (2015年～) (2) 海洋天体ブリューム微粒子軌道上分析装置BBM開発実験 (2015年～) & 国際海洋天体探査に機器参加して、早期から研鑽を積む (2020年代半ば) (3) LDM-BBM模擬火星土壌試料分析試験 (2015年～)
サンプルリターンカプセル技術	太陽系探査	A	2020年代初め	TRL8-9 (はやぶさ, はやぶさ2) TRL3-4 (CAESARなど)	「はやぶさ」カプセルのヘリテージを利用しつつ、MMX, CAESAR, OKEANOS等の各ミッションの要求を満足する高性能化の技術開発 (大型化・高速再突入・低温保管等) が必要
アストロバイオロジー研究を可能とする往路惑星保護技術 (1) 火星の特別な場所へのピンポイント着陸技術 (2) 火星の特別な場所に着陸機を活動可能にする滅菌・汚染管理技術 (3) 火星&海洋天体への衝突を回避する軌道制御技術	月・火星着陸探査・外惑星領域探査	A	(1) 2020年代半ば (2) 2030年代初め (3) 2020年代後半	(1) SLIMで大気なし重力天体のピンポイント着陸のFM実証 (2021年にTRL9)、地上風洞・高層大気での模擬火星大気飛翔実証 (2018年段階でTRL3)、小型EDL実証ミッションで大気あり重力天体のピンポイント着陸のFM実証 (2018年段階でTRL2) (2) OKEANOS着陸機で滅菌・汚染管理技術のFM実証 (2018年段階でTRL3) (3) はやぶさ2で火星衝突回避軌道計算でCOSPARカテゴリー承認を取得 (2014年段階でTRL9)、OKEANOSで外惑星領域小天体への近傍運用 (2018年段階でTRL3)	(1) SLIMでFM開発 (～2019年)、EDLミッションでFM開発 (～2020年代半ば?) (2) OKEANOSでFM開発 (2020年代初め) (3) はやぶさ2で宇宙実証 (～2015年)、OKEANOSでFM開発 (2020年代初め)
アストロバイオロジー研究を可能とする復路惑星保護技術 (1) 火星地下土壌・海洋天体微粒子等、COSPARカテゴリーで「制約付き地球帰還」となる採取試料の地球帰還以前の滅菌・汚染管理技術 (2) 同試料保管容器を搭載する地球帰還カプセル・地上回収技術・カプセル内密閉分析技術・開梱後実験室内密閉分析技術・安全確認分析技術、同試料の長期保管技術など。	月・火星着陸探査・外惑星領域探査	A	2020年代半ば	(1) BSL4クラスの滅菌・汚染管理技術を海洋探査等から技術移転 (2018年段階でTRL2) (2) はやぶさで採取試料の「制約なし」地球帰還・地上回収・開梱後実験室内密閉分析のFM実証 (2010年でTRL9)、はやぶさ2で同左実証 (2020年でTRL9)、MMXで同左実証 (2029年でTRL9)。カプセル内密閉分析技術・安全確認技術・同試料の長期保存技術は、海洋探査等より技術移転 (2018年段階でTRL2)	(1) 海洋天体ブリューム微粒子軌道上分析装置BBM開発実験 (2015年～) & 国際火星着陸探査や国際海洋天体探査に機器参加して、早期から研鑽を積む (2020年代半ば)、JAMSTEC等近隣分野機関との連携 (2012年～) (2) はやぶさ&はやぶさ2で宇宙実証 (～2020年)、MMXでFM開発 (2020年代初め)、JAMSTEC等近隣分野機関との連携 (2012年～)

4章 直近ミッションの実現に必要な技術(ミッション別)

本章では、戦略シナリオの実施に必要な技術目標を抽出するため、今期中期計画にてプロジェクトまたはプロジェクト準備活動を行う各ミッションが重要と考えている重要技術について記述する。下記表には、各ミッションの重要技術と3章で示した技術領域の対応を示した。これらより、直近技術の大半が次期中期計画以降の将来ミッションにおいても重要技術として識別され、継続的に発展させることで将来の宇宙科学ミッションを支えていく構図と、そのための戦略を読み取ることができる。

直近ミッションの実現に必要な技術ならびにこれら技術の将来技術領域への接続

直近ミッション	必要技術	3章の技術領域	3章の技術項目
XRISM	機械式冷凍機	宇宙用冷凍機	各種冷凍機
LiteBIRD	ミリ波高精度観測 冷却望遠鏡検証 極低温冷却 偏光変調器	センサ技術 宇宙用冷凍機	赤外線観測技術 各種冷凍機
SPICA	冷凍技術	宇宙用冷凍機	各種冷凍機
小型 JASMINE	熱寸法安定望遠鏡	軽量光学系	低熱膨張鏡
Solar-C EUVST	軽量光学系技術 小型軽量化衛星バス	軽量光学系 月惑星探査機	超精密軽量光学望遠鏡 小型軽量コンボ等
HiZ-GUNDAM	X線結像光学系 大型撮像検出器	軽量光学系 センサー	低雑音・高感度センサ
MMX	火星圏往還 高度な表面探査 高速通信	月惑星探査機 天体表面活動 月惑星探査機	深宇宙航行 大容量通信
OKEANOS	電力セイル 高比推力イオンエンジン 試料採取装置 質量分析器	月惑星探査機 月惑星探査機 天体表面活動 天体表面活動	ソーラー電力セイル イオンエンジン 試料採取機構 質量分析・その場分析
SLIM	精密航法誘導制御 小型軽量機体	月惑星探査機 月惑星探査機	画像航法 小型軽量コンボ等
DESTINY+	イオンエンジン 軌道計画 先進的熱制御 高速フライバイ撮像	月惑星探査機 月惑星探査機	イオンエンジン 先進熱制御
JUICE	中性粒子質量分析 光検出素子 後置光学系・検出器モジュール	天体表面活動 センサー 軽量光学系	質量分析・その場分析 低雑音・高感度センサ
CAESAR	サンプルリターンカプセル	天体表面活動	SR カプセル

以下には、これら重要技術について、ミッションにおける位置付けと開発状況等について、各プロジェクトチームに情報提供いただく形で記述した。情報を提供いただいた各プロジェクトマネージャーに感謝する。

4. 1 XRISM

4. 1. 1 ミッション概要

X線分光撮像衛星(XRISM)は、先行計画であるASTRO-H(ひとみ)の科学成果を早急に回復べく計画された。JAXAとNASA、ESAおよびプロジェクト参加各機関によって開発された「ひとみ」は、2016年2月17日に打ち上げられ、観測装置はほぼ予定の動作と性能確認がなされた。しかし、観測が本格化する直前に、同年3月26日に通信が途絶し4月28日に運用を断念した。

XRISMの検討にあたっては、「ひとみ」の初期運用によって得られたすべての搭載観測装置の動作実績や実証された性能、初期科学成果、さらに、打ち上げが予定される2020年代に予想される、軟X線・硬X線および関連する観測装置の世界的な状況、つづく2030年代への学術的な動向が考慮された。その結果、「ひとみ」の搭載機器のうち、特にX線マイクロカロリメータによる超高分解能X線分光と撮像に焦点を絞った構成とした。すなわち、2台の軟X線反射鏡の焦点面に、それぞれX線マイクロカロリメータ分光撮像器と広視野のX線CCDカメラを搭載するミッションとした。XRISMは、「ひとみ」の科学目的の主要な部分と、技術的な到達点を引き継ぎ、さらにそれを拡大する計画である。

「ひとみ」が拓きXRISMが築く新たな超高分解能X線分光によって、世界のX線天文学の地平が急速に拡大すると期待される。XRISMで取り組む超高分解能X線分光は、これまでの観測の単なる精密化や検証ではなく、質的に異なる天体物理学やプラズマ物理学を作り出す。XRISMは、ミッションの意義として「宇宙の高温プラズマにおける物質循環・エネルギー輸送過程と天体の進化の解明」を掲げ、その下に4つのテーマ、すなわち、「宇宙の構造形成と銀河団の進化の研究」;「宇宙の物質循環の歴史の探究」;「宇宙のエネルギー輸送と循環の解明」;「超高分解能X線分光による新しいサイエンスの開拓」を掲げる。これによって、超高分解能X線分光で拓く宇宙の新たな地平を展開する。これらの科学目的は、2030年代に計画されている欧米のAthena計画やLynx計画にも引き継がれ展開されることを企図し、XRISMの国際協力が推進されている。

4. 1. 2 日本の役割／海外からの寄与

カロリメータ技術に基盤をおくX線天文衛星計画は、2030年代の実現を目指して欧米でも計画され、国際的なロードマップに位置づけられたフラッグシップミッションである。このように、本ミッションは世界的な潮流を開拓するものとして、NASAおよびESAとの協定に基づき推進されている。NASAとは、JAXAの主導のもとに行うジョイントプロジェクトと位置づけられている。

XRISMは、打ち上げ後約数ヶ月の初期運用において、衛星および観測装置の立ち上げと、較正、性能確認を行ったのち、通常運用期間を通して、JAXA、NASA、ESAの合意に基づいた国際的な天文台として、公募観測に供される。観測データおよび解析ツールもまた、プロジェクトにおいて整備され、国際的な標準にもとづいて提供される。

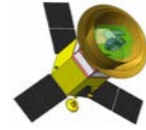
4. 1. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

我が国は40年にわたって X 線天文衛星を打ち上げ、世界の X 線天文学に継続的に貢献をしてきた。これまでに運用した6機の衛星には、いずれも当時の最先端技術を活用した観測装置が搭載された。「ひとみ」搭載用として開発された軟 X 線分光検出器(マイクロカロリメータ)は、「すざく」など従来の衛星の装置に比較して約30倍優れた分解能を実現した。マイクロカロリメータは、0.1 K 以下の極低温下で動作する検出器であり、これを衛星環境下で実現する冷凍機技術が鍵を握る。「ひとみ」では、多層の真空断熱容器(デューワー)、多段の冷凍機、液体ヘリウムなどを組み合わせることで 効率的に検出部での極低温(0.05K)を実現した。このうち、衛星環境の 300 K 程度から 4 K までを機械式冷凍機で、最後の4K から0.05 K まで冷却するのに断熱消磁冷凍機を用いた。最終段こそ NASA 製であるが、そこにいたる3段に渡る機械式冷凍機システムは、長年にわたって我が国で開発されてきた先端技術の精華であり、一連の開発において「ひとみ」以前に、「すざく」(2005年打ち上げ)、「あかり」(2006年打ち上げ)「かぐや」(2007年打ち上げ)、SIMLES(2009年 ISS きぼう実験棟搭載)、「あかつき」(2010年打ち上げ)において宇宙での実績を積んでいる。これは軌道上実績において他国を大きくリードしているキー技術であり、XRISM、SPICA、LiteBIRD などの日本の科学衛星だけでなく、2030年代に欧州の Cosmic Vision に基づく L クラス旗艦ミッションである Athena 衛星においても、採用が予定されている。

4. 1. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

前項で述べたように、この機械式冷凍機技術は、XRISM、Athena といった X 線天文衛星だけでなく、SPICA などの赤外線、SMILES、LiteBIRD などの電波観測においても不可欠な技術であり、電磁波を利用した観測の基盤技術のひとつといって過言ではない。宇宙においてこれを実現するには、宇宙の真空と熱環境下で、なおかつ衛星の厳しい電力、スペースの制限のもと確実に動作する必要がある、さらには、一定の自律的な制御が必要であり、多岐にわたる開発と技術的実証が必要になる。たとえば欧州主導の Athena 計画においては、欧州主導の冷凍機システムの開発も試みられたが、結局、要求性能をみだし、実績のある日本のシステムがそれを凌駕した。このような替えのきかない技術による貢献は、特に高く評価される。すなわちこの技術は、宇宙科学における日本のプレゼンスの源泉の一つであり、将来の国際協力ミッションにおける観測機会の獲得につながる。これは日本の宇宙科学が、単独で旗艦ミッションを持ち得ないような状況においても、世界の第一線にとどまるために不可欠である。

4. 2 LiteBIRD



4. 2. 1 ミッション概要

本計画の主目的は、インフレーション宇宙理論を検証することである。インフレーションによって生み出された原始重力波は、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光度分布に、Bモードと呼ばれる特徴的な渦状のパターンを刻印する。その検出は、量子重力理論の試験をも可能とする。CMBのBモード偏光の検出には宇宙からの観測が必須であり、LiteBIRD計画は、2020年代にそれを実現する世界で唯一の計画である。JAXA 宇宙科学研究所、東京大学 Kavli IPMU、KEK 素粒子原子核研究所、岡山大学を中心に、米欧加との国際協力により実現する。

4. 2. 2 日本の役割／海外からの寄与

日本は、衛星システム、打ち上げを担当する。ミッション機器は、ヨーロッパ、米国、カナダと日本が分担する。LiteBIRDは極低温5Kに冷却された2つの望遠鏡 低周波望遠鏡と高周波望遠鏡からなり、高周波望遠鏡はヨーロッパ、低周波望遠鏡は日本が担当する。0.1 Kに冷却された焦点面検出器および低温読み出し回路は、米国が担当し、常温読み出し回路はカナダが担当する。常温から4 Kへの冷却システムは日本が担当し、4K以下の冷却はフランスが担当する。

4. 2. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

(ア) ミリ波を高精度観測する技術

LiteBIRDは、34 - 448 GHzというミリ波の波長領域において偏光強度を約30 nKにて検出する。そのためには、主ビームの光学効率を高だけでなく、遠方サイドローブを-60 dBに抑える必要がある。電磁波を制御する技術により可能となる。電磁波を制御するということは、電磁波の最適化設計、電磁界シミュレーション、そして、電磁波を高精度で計測する技術をすべて持ち合わせるということである。これらは、地上の大型電波望遠鏡ALMAで培われた技術が発展したものである。

(イ) 冷却望遠鏡を検証する技術

冷却望遠鏡を打ち上げ前に、その性能を含めて地上で検証することは、理想的であるが、容易では無い。例えば、ハッブル宇宙望遠鏡は、打ち上げ後ピントのずれが、宇宙飛行士によって宇宙で修復がおこなわれた。また、その後継機となるJWSTは、地上での検証に多額の予算を費やしている。LiteBIRDでは、JWSTの1/30という限られた総予算のなかに、冷却望遠鏡を極低温に冷却した状態での検証を計画している。それは、

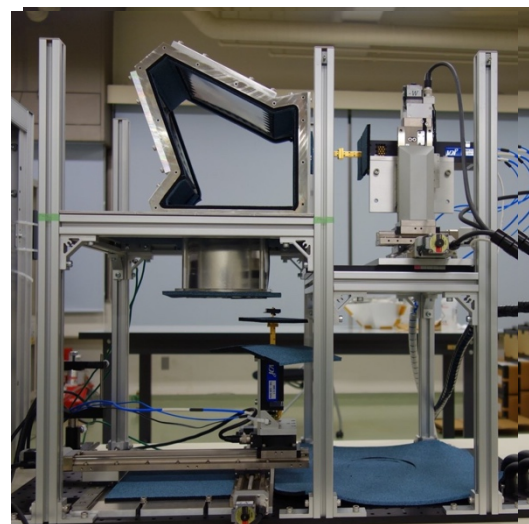


図1 LiteBIRD 低周波望遠鏡 (LFT) 1/4スケールモデルと近傍解アンテナパターン測定システム

極低温2段傘を取り入れることにより、90K の液体窒素チェンバー内で、宇宙極低温環境を模擬したミッション部の end-to-end 試験する。極低温傘は、IR 台車と呼ばれる衛星を液体窒素チェンバーに運ぶ台車に取り付けることで、チェンバーに改造を加えることなく、迅速に準備できることも特徴である。

(ウ) 極低温冷却技術

極低温の冷却技術は、JAXA-SHI が協力して培ってきた機械式冷凍機技術であり、SMILES, AKARI, Hitomi などの衛星での実績を積んでいる。20K の冷却が可能な2段式スターリング冷凍機や1.7K や4.5K に冷却が可能なジュールトムソン式冷凍機からなる機械式冷凍機および放射冷却を利用したシステムである。次世代赤外線衛星 SPICA や Athena などの将来衛星ミッションでも使われる重要な技術である。

(工) 偏光変調器

東京大学 kavli IPMU のグループによって、超伝導軸受をもちいた広帯域偏光変調器が開発されている。サファイア基盤への反射防止コーティングや超伝導軸受は、次世代の宇宙科学にも重要な技術である。

4. 2. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

(ア) ミリ波に限らず、宇宙を観測する望遠鏡の技術は、宇宙の始まりや成立を調べる宇宙科学に必須の技術である。日本が宇宙科学の最先端を切り開くことは、国際的な宇宙科学の競争や協力において必要であることは言うまでも無い。特に現代の望遠鏡に要求されるのは、集光効率を高めるのみならず、サイドローブを抑制すること、つまり電磁波を制御する技術である。これらは、例えば、系外の地球型惑星の大気を観測する技術と同じである。

技術的な波及効果としては、通信における効率を高めるとともに、混信を防ぐことや、不要な電磁波を減らすなど、生活にも密接に繋がっている。例えば、東京オリンピック2020までに導入される予定の第5世代移動通信システム（通称 5G）においても、このようなミリ波制御技術が重要となっている。

(イ) 放射冷却 V-groove は、機械式冷凍機と組み合わせることにより、宇宙における冷却において有効かつ強力な手段である。一方、冷却望遠鏡や V-groove を打ち上げ前に深宇宙と同じような極低温状態に冷却して試験することは容易ではない。それを解決する手段考案することにより、より遠方への宇宙機への探査における温度環境提供することが可能となる。

(ウ) 宇宙機の冷凍機技術は、次世代赤外線衛星 spica や X 線衛星 athena とも共通の技術であり、日本の宇宙科学の未来においても必須である。地上用途の冷凍機技術は、リニアモーターカーや医療 MRI など産業用途において大きな市場となりつつある。宇宙機の冷凍技術は、地上用途に比べて、低消費電力という特徴をもつ冷却技術として、環境を考慮した低二酸化炭素社会に向けて役立つ。

(工)広帯域偏光変調器は、電磁波の偏光観測という将来の宇宙科学ミッションに新しい切り口を与える。超伝導軸受は、従来の軸受に比べて、摩耗による劣化が無く、回転機構の寿命を長くできる可能性を秘めている。

4. 3 SPICA

4. 3. 1 ミッション概要

次世代赤外線天文衛星 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics)は、多様な物質と生命を育む惑星を有する、現在の宇宙が作られてきた過程の最重要部分を解明するための、高感度赤外線観測を目的とする国際協力ミッションである。

SPICA は以下の2大科学目的を設定している。

1. 銀河進化を通しての重元素と星間塵(ダスト)による宇宙の豊穡化過程の解明

138億年前の誕生時には元素として水素とヘリウムのみであった宇宙が、恒星や銀河の形成と成長によって多種の元素が生産され、星間塵に満ちた現在の宇宙に至った過程を明らかにする。

2. 生命存在可能な世界に至る惑星系形成メカニズムの解明

太陽系のような、生命の存在する惑星系がどのような条件で、どのようなメカニズムで形成されたかを理解するため、原始惑星系円盤から惑星系への進化過程を明らかにする。

上記の目的を達成するためには、中間・遠赤外線において、極めて高感度の分光観測が必要である。このために、日本が戦略的に開発してきた宇宙用冷却技術によって、大口径(2.5 m)の望遠鏡及び観測装置全体を極低温(8 K 以下)に冷却し、熱放射雑音を大幅に軽減することにより、極めて高感度の赤外線観測を実現する。SPICA は、JAXA の新基幹ロケット H3によって、太陽－地球系の第2ラグランジュ点周りのハロー軌道に投入される。



図1 SPICA

4. 3. 2 日本の役割／海外からの寄与

SPICA は世界初の超高感度の宇宙赤外線天文台を、日欧の宇宙機関が中心となって実現する計画であり、日本においては宇宙科学の戦略的中型ミッション、欧州では ESA(欧州宇宙機構) Cosmic Vision M5(中型ミッション5号機)が想定されている。ESA はプロジェクトをリードするとともに、衛星システム全体、望遠鏡などを担当する。日本は極低温冷却機構を含む熱構造系、H3ロケットによる打上げ、中間赤外線観測装置を担当する。さらに欧米16か国を中心とした国際コンソーシアムが、二つの遠赤外線観測装置を担当する計画である。

2018年5月に、ESA M5一次選抜の結果が発表され、SPICA は25件の提案から概念検討を進める3件のミッションの一つとして選ばれた。2021年の最終選抜に向けて、日欧で検討活動が進められている。最終選抜に残るためには、以下に示す技術開発を着実に進め、ミッションの確実な実現性を示すことが重要である。

4. 3. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

[宇宙用冷却技術]

SPICA の要となる最重要技術の一つが、望遠鏡と観測装置全体を極低温に保つ冷却系である。日本は、この分野において戦略的に技術開発を進めており、80 K から 1 K 級まで広い温度範囲をカバーする機械式冷凍機のラインナップを有し、特に20 K 以下の冷凍機については小型の宇宙用冷凍機として世界トップの効率を持つなど、国際的に見ても世界を先導する成果を上げている。これらの冷凍機は、天文観測用のみならず地球観測など実用衛星への搭載も視野に入れたものである。

このように、日本の宇宙用冷却技術は世界最高レベルにあるが、SPICA の実現にむけて、さらに以下のような技術開発を進める必要がある。

1. 長寿命化

SPICA はノミナル3年、ゴール5年の運用を目標としている。ミッション期間中冷却性能を確実に維持するための、長寿命化技術の確立が必須である。ゴールとしては Athena を視野に10年を目指している。

2. 低擾乱化

冷凍機の振動は、検出器信号のノイズとなるほか、望遠鏡の指向性能に影響を与え、高感度・高性能の観測を困難にする。また、振動の一部は熱に変換され冷却性能に影響を与える。このため、低擾乱化は極めて重要な技術課題である。冷凍機のみならず、低価格かつ信頼性の高い振動アイソレータの開発を必要とする。要求は現状の1/10、ゴールは低周波域で1/100である。

3. ヒートスイッチ

SPICA に搭載される冗長系も含む複数の冷凍機を最適な構成で運用し、確実な冷凍機性能を得るため、熱経路を切り替えるヒートスイッチが必要である。現在の技術では、ON/OFF を確実にかつ高効率で切り替えるスイッチは実現出来ておらず、技術開発が急務である。

4. 放射冷却システムとの効率的なハイブリット化

SPICA の冷却系は、放射冷却と機械式冷凍機のハイブリット方式である。高効率の放射冷却システムの開発と、機械式冷凍機との効率的な組み合わせを追求し、着実に高効率の冷却を目指す。

4. 3. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

[宇宙用冷却技術]

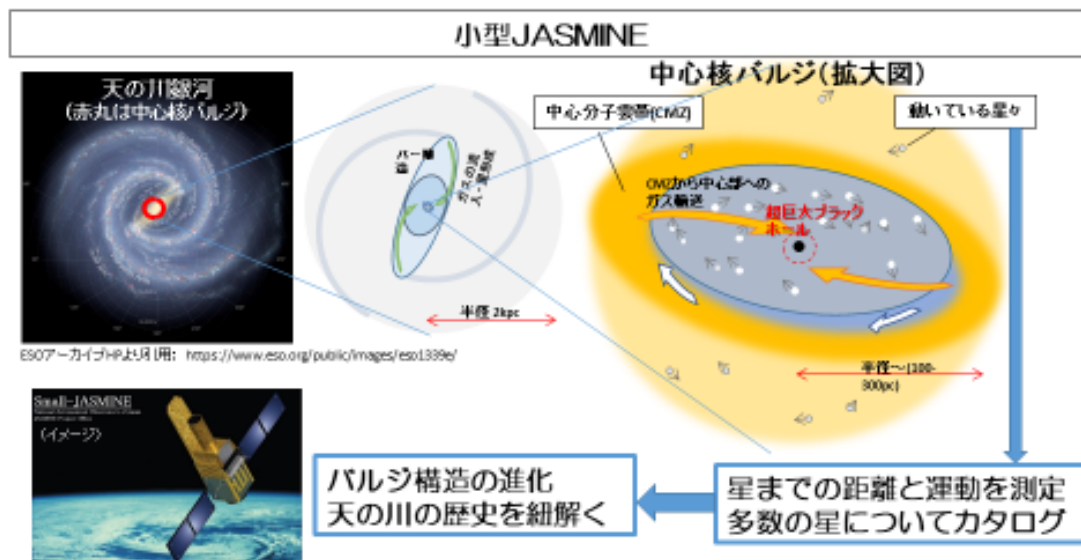
本研究開発は、SPICA のみならず宇宙背景放射偏光観測衛星 LiteBIRD, X 線天文衛星 Athena、および地球大気観測ミッション SMILES2 への搭載を視野に入れて分野横断的に開発を進めているものである。また、これにより、日本は宇宙用冷却技術において世界的に優位な立場になり、将来のミッションにおいて存在感を示すことが出来る。

また、これらの技術の応用として医療機器や次世代交通システムなど極低温技術を必要とする分野に広く波及効果が期待出来る。

4. 4 小型 JASMINE

4. 4. 1 ミッション概要

宇宙の構造がどのように形成されたのかを知る上ために銀河の形成進化の解明が必要である。そのためには、詳細な観測が可能である唯一の銀河である、我々が属する銀河の構造、形成、進化を明らかにすることが礎になる。特に我々の銀河系中心部には巨大ブラックホールが存在することから、銀河系構造と巨大ブラックホール(BH)の進化の解明に結びつく中心核バルジ領域の探求を小型 JASMINE の主たる科学目標とする。中心核バルジは、銀河系バルジやバー構造と銀河系中心との物理的関係をつなぐ重要な領域でもあり、特異で複雑な様相を呈する中心核バルジの力学的構造の探求とそれを基にした中心核バルジの起源と進化の解明を目指す。そこで、近赤外線帯域で銀河系中心核バルジ領域に対して同一天体を高頻度で多数回撮像観測し、観測データを地上で解析することにより星の天球面上での位置変動の時系列データを得て、そこから導出された星の年周視差、固有運動等の必要な物理情報をカタログとして作成し、世界の研究者へ同時公開する。そのためにイプシロンロケットで30cm 級の光学望遠鏡を太陽同期軌道に打ち上げ、3年の軌道上での観測を行うことを計画している。



4. 4. 2 日本の役割／海外からの寄与

小型 JASMINE は日本が主導して行うミッションである。ただし、検出器は米国製品を用いることもあり、検出器とその駆動系モジュールについては、米国海軍天文台(USNO)との協力を打診中である。また、衛星とのコマンド送信・衛星からのデータ受信に関して地上通信局の提供等による欧州宇宙機関(ESA)からの協力を得る調整を行っている。データ解析についても ESA を通してヨーロッパの大学や研究機関との協力を検討中で、ハイデルベルグ大学とドレスデン大学の研究者から小型 JASMINE のデータ解析開発に参加を希望するとの LOI を受け取っている。ミッションの科学的目的については、ESA が可視光を用いて約10億個の星の位置天文観測を行う Gaia 衛星を、2013年12月に打ち上げて観測を開始しており、2022年頃以降に最終カタログをリリース予定であるが、その Gaia では測定が困難な対象と

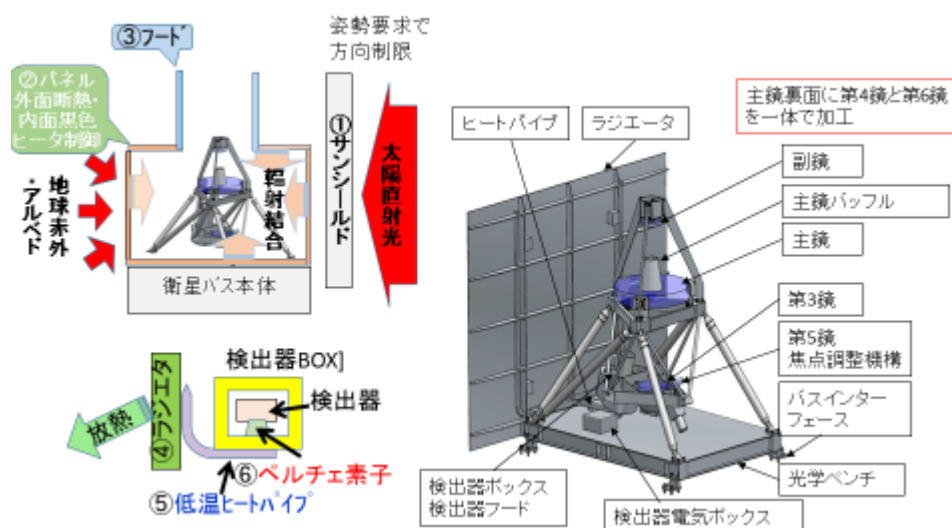
して、銀河系中心核バルジ領域や短時間変動を伴う天体を狙う小型 JASMINE は、Gaia を補完するものとして世界的な期待が大きく、ヨーロッパの将来の可視光位置天文観測衛星計画である Theia プロジェクト、及び銀河系中心付近の視線速度、金属量、年齢等を測定する分光観測を行う APOGEE-2とはサイエンス連携等に関する MOU を締結した。

4. 4. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

小型 JASMINE の望遠鏡は、複数枚撮像し重ね合わせてキャリブレーションを行った後の精度として 100pm を要求する。鏡面には、クリアセラム TM -Z EX という日本製のガラスセラミック(熱膨張率 $<0 \pm 1 \times 10^{-8}/K$)、構造にはスーパー・スーパーインバーという極低熱膨張率($<0 \pm 5 \times 10^{-8}/K$)の材料を用いて設計し、熱寸法安定性を実現している。スーパー・スーパーインバーは、この目的のために国内材料メカと共同で開発した材料であり、熱処理と成分を調整して低熱膨張率を実現すると同時にマルテンサイト変態温度を $-100^{\circ}C$ 以下に下げることが両立し、低温では使えなかったスーパーインバーの弱点を克服したものである。これによって衛星搭載では始めてとなる全金属製のアサーマルな構造となり、安定的かつ設計値の実現性が高い。

望遠鏡は外部からの熱入力を遮蔽し、さらに全方向をパネルとフードで覆い、外面を断熱し、パネルに設けたヒータで温度変動を吸収して温度安定化を図っている。これにより温度変化の要因(外部熱入力)を絶ち、「遠火でじんわり保温」することにより、観測期間半周回中(50分)の温度変化を $0.1^{\circ}C$ 以下の精度で保つことが可能な設計となっている。

熱寸法安定性は、高精度のセンサー全てにとって必要となるキー技術であり、全て国産の技術と材料により超高精度を実現したことは日本の強みとなる。



4. 4. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

2014年度に開発したスーパー・スーパーインバーの膨張率は従来品より一桁低く、熱ひずみも極めて小さく、その実証のための高精度測定自体がチャレンジングである。0.1ミリ秒角のアライメント変動や10nm以下の鏡面精度の変動など高精度計測の手法自体の開発を行っている。光学観測ミッションにおいては高度な安定性は共通の要求であり、この方法が確立すれば、今後の多くのミッションに標準的な計測方法として役に立つものと期待される。継手部に生じる熱ひずみは、構造設計で推測し難いが、主鏡面外部に保持部を設け回転もフリーとするストレスリリーフ構造を考案した。鏡面を裏表にして取り付け可能な特徴を利用し、裏面を高精度の平面鏡に研磨して熱ひずみ変形を10nm程度の高精度に計測する計画である。このストレスリリーフが設計通りの性能を検証できれば、今後の衛星搭載センサーへ応用可能で効果が大きい。また本技術は、小型 JASMINE ミッションをターゲットとしているものの、熱・構造部分でクリティカルな部分は多くのミッションで共通している。そのため、それらの部分の基礎的なデータを小型 JASMINE で蓄積することは、開発期間が4, 5年程度以内と限定されている公募型小型ミッションでの今後の他のミッションに対しても開発期間の低減につながり有用であると考えられる。ゼロ膨張に近い材料による高精度で温度変化の影響を受けない光学系として宇宙のみならず多くの分野での応用が期待でき、さらに熱ひずみの抑制や熱制御も加えて実現している超高精度の光学系は衛星搭載光学系としての応用が期待できる。

4. 5 Solar-C EUVST

4. 5. 1 ミッション概要

宇宙に如何に高温プラズマが作られ、太陽が如何にして地球や惑星に影響を及ぼしているのかという命題を探究するため、Solar-C_EUVST 衛星計画は、太陽表面から太陽コロナ・惑星間空間までのエネルギーと質量の輸送を理解し、宇宙プラズマ中で普遍的に起きている基礎物理過程を検証する。観測装置として極端紫外線分光器を用い、太陽を長時間観測できる太陽同期極軌道から、太陽大気の色層から太陽コロナに到る温度領域を隙間なく観測する。太陽大気全体に亘り、プラズマのダイナミックな現象に追従するため、観測装置は以前に飛翔のものに較べておよそ1桁以上の性能(空間・時間分解能、波長範囲)向上を見込む。

太陽の宇宙空間環境への影響は、通常の太陽大気に起因するものと、太陽フレアに代表されるような突発現象に起因するものの主に2つに大別される。そこで、Solar-C_EUVST ミッションの科学目的として、以下の2つを設定する。

- I. 色層・コロナと太陽風の形成に必要なエネルギー・質量輸送機構および散逸機構の究明
- II. 太陽面爆発現象の物理過程の解明

これら2つの科学課題を通じて、Solar-C_EUVST ミッションの使命は、どのようにして活動的な太陽が作り出されるか、という太陽物理学で最も基本的な問いに答えを出すことである。

太陽外層大気は、太陽表面(光球, 6000度)の上に色層(1万度)～コロナ(100万度以上;フレア～1000万度)と呼ばれる2桁以上も温度の異なる大気構造から構成される。色層とコロナの間は磁力線でつながり、物質であるプラズマとエネルギーがこれらの間でやり取りされる一つのシステムである。ここで発生する太陽の磁気活動を本質的に理解するために、

- A). 色層からコロナに亘る太陽大気の色温度層を同時に切れ目なく観測する
- B). 太陽大気を構成する基本構造とその変化を高空間・時間分解能で追跡する
- C). 太陽大気で起きている基礎物理過程の理解に必要とされる、速度場、温度、密度など分光情報を獲得する。

Solar-C_EUVST ミッションは、以上3つのことを同時に実施する極端紫外線撮像分光望遠鏡(EUVST)をJAXA 公募型小型衛星に搭載する。

EUVST は、A) 17-128nm の波長域(1万度から2000万度)を、B) 空間分解能0.4秒角, 時間分解能0.5秒(最短)で観測し、C) 2km/s の視線速度変化を検出する高性能観測を行う。17-128nm の波長域は、色層から遷移層・コロナ、そしてフレアで生成される超高温プラズマまで広い温度帯(1万度から2000万度)で隙間なく分光観測できる輝線が存在する波長域である。コロナ観測における空間分解能

0.4秒角は、今まで実現された分光観測に比べ約7倍高く、太陽観測衛星「ひので」が太陽表面で実現した空間分解能とほぼ同じ空間分解能である。この空間分解能により、表面上空に広がる外層大気に存在する基本的な磁気構造を初めて識別できる。高い時間分解能は、従来の観測に比べ EUVST が 10-30 倍高い有効面積を持つことで実現される。以上、従来の観測では実現できていない高い性能で、様々な輝線のスペクトルを高分散分光計測して、視線速度や温度・密度などの物理診断を行う。

図に示すように、EUVST 装置全体の構造が衛星バス系上部に搭載される。EUVST は、口径約30cm の指向駆動可能な単鏡(軸外し放物面鏡)で太陽像を分光器部入り口のスリット面に結像し、スリットから取り込まれた太陽光は、回折格子で分散され、検出器(CCD 及び増感撮像センサー)でスペクトルが取得される。また、スリット面に結像された太陽像は反射され、画像も取得される。衛星総重量は約500kg であり、イプシロンロケットにより高度600km 以上の太陽同期極軌道に投入され、2年間(最低限)にわたり太陽の連続観測を実施する。

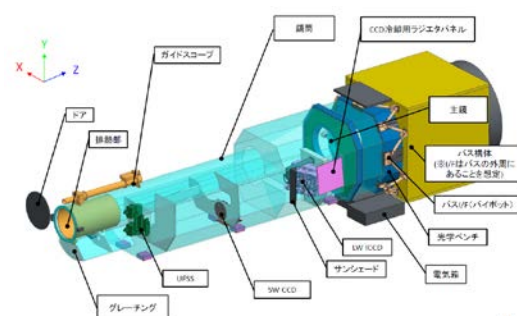


図 Solar-C_EUVST 概念図

Solar-C_EUVST ミッションには太陽物理学の科学的優先度を反映した2つの側面がある。一つ目は、太陽で起きている多くの物理現象が宇宙で起きている物理現象に敷衍することができることである。本ミッションは、得られる洞察や知見を天体プラズマの基礎物理過程の洞察、知見へと展開することができる。二つ目は、太陽が、グローバルな先進的技術社会の宇宙空間環境を支配しており、宇宙に基盤をおく技術への依存度が増え続けている現在、この宇宙空間環境が直接、我々の日常生活に結びついているという事実である。本ミッションは、地球環境、社会環境に直接影響を与える太陽大規模噴出や太陽風の起源と動力学に関する知見を大きく発展させるものである。

4. 5. 2 日本の役割／海外からの寄与

長年にわたる「ひので」高解像度観測の成果は、今後の太陽研究が進むべき方向を提示している。米国4m 望遠鏡 DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope; ハワイ、2019年完成予定) は太陽表面の超微細構造の観測を目論むが、Solar-C_EUVST ミッションは同時期に地上からは観測できない遷移層・コロナの高解像度の観測を行う。高空間分解能のスペース太陽観測は、「ひので」の技術を礎に日本が担うべきミッションとして世界中から期待されている。

また、2025年頃に Parker Solar Probe (NASA, 2018年打上) と Solar Orbiter (ESA, 2020年打上予定) が太陽に接近して、「その場」観測と接近した軌道からの太陽観測を実施する予定である。太陽表面と内部惑星間空間のつながりを理解する上で、その中間をカバーする Solar-C EUVST による観測

は必要不可欠である。なお、中国とインドが2020年台初頭に初の太陽観測衛星を打上げる予定であるが、太陽全面をカバーする中空間分解能の撮像観測である。

EUVST は日本が主導して開発される望遠鏡であり、米国および欧州諸国からの協力を得て、世界一の性能をもつ分光望遠鏡となる。日本は、高空間分解能を実現するために核となる口径約30cm の指向駆動可能な主鏡機構や望遠鏡全体構造を開発する。分光器部に必要となる回折格子(グレーティング)や検出器の開発には、EUV 観測で実績を持つ米国および欧州諸国が寄与する。

4. 5. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

世界一の高性能観測を実現する EUVST 装置を実現するためには、「軽量光学系技術」が重要となる。高性能観測のうち、特に、高空間分解能は、日本が開発する主鏡機構および望遠鏡構造がキーとなる技術である。中口径(約30cm)の主鏡は、軽量化のために薄厚化を進める一方で、軌道上運用温度が地上試験温度とは大きく異なり、主鏡支持機構を介して発生する熱変形量を nm オーダーで制御することが求められる。また、観測波長が EUV 域と短く、散乱光を抑えるために、鏡面変形の高周波成分(マイクロラフネス)を0.5nm 以下に抑える。この軽量化ミラーは、指向駆動するためのジンバル型のティップティルト機構および焦点調整のためのリニアステージ機構上に搭載される。また、望遠鏡構造は3m を超える長さを持つ CFRP 構造体で、主鏡とスリット、回折格子や検出器といった光学系の位置関係を50 μ m 以下で維持する。構造は軽量化を図る一方で、ロケット搭載上要求される高剛性を満足させる必要がある。

これらに必要な「軽量光学系技術」に関する技術は、高解像度観測を実現した「ひので」望遠鏡の技術の発展として技術開発が進められる。「ひので」望遠鏡は固定鏡で0.2秒角を解像する能力を実現したが、Solar-C_EUVST ではティップティルト機構やリニアステージ機構と組み合わせた複雑な主鏡機構で、ほぼ類似の空間分解能を実現する。

この開発は、単に「軽量光学系技術」の技術に留まらず、「小型軽量化衛星バス技術」の高精度化にも貢献する。高空間分解能の実現には高い指向制御が必要であり、約500kg の小型科学衛星では初めてのレベルである。主鏡機構による指向制御や超高精度な太陽センサなど高指向制御を実現する姿勢制御、衛星内に存在する擾乱の制御や地上での試験評価といった擾乱管理、など、「ひので」やそれ以降の高解像度衛星で培った技術をさらに発展できる。

4. 5. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

Solar-C_EUVST が目指す高空間分解能の観測は、天文学や地球・惑星観測など、地球周回衛星によるリモートセンシングが将来的に目指す方向性と符合する。太陽観測においても、Solar-C_EUVST ミッションに引き続いて、太陽磁場の精密観測などを行う高い空間分解能を必要とする中型

望遠鏡の飛翔など、2030年台に実現を目指す構想により、新たな発展が期待出来る。約500kg の小型科学衛星で、サブ秒角の空間分解能を持つ観測を行う技術を獲得することは、高解像度のリモートセンシング観測を従来よりも頻度高く行なうことができるようになる。これは、太陽観測に限らず、天文観測、地球観測や惑星観測など、大型望遠鏡では出来ない、多様な課題に対して日本の宇宙科学が取り組むことができる素地を形成できる。

また、主鏡機構に用いられる駆動機構には、宇宙機上で確実に可動する高い信頼性が要求される。宇宙科学ミッションでは海外の研究機関からの寄与で駆動機構を搭載するケースが多く、日本国内での開発は遅れている。Solar-C_EUVSTにおいてこれらの開発が進むことにより、搭載観測機器における駆動機構が普通に使われる時代がやってくると期待される。それは、天体表面到達技術で上げられている「試料採取機構」、「試料密閉機構」といった駆動機構の技術にも波及効果がある。

4. 6 HiZ-GUNDAM

4. 6. 1 ミッション概要

科学衛星 HiZ-GUNDAM は、タイムドメイン天文学を重点的に推進するためのミッションであり、2つの科学課題を掲げている。1つ目は、宇宙年齢が7.7億年よりも若い(赤方偏移が $z > 7$)の初期宇宙において最も明るい光源であるガンマ線バースト(GRB)の観測を通して、初代星・ブラックホールの形成、宇宙再電離、重元素合成の歴史の解明など、初期宇宙観測のフロンティアを目指すことである。2つ目は、重力波と同期した突発天体を観測することで、ブラックホールが誕生する瞬間の極限時空環境における物理現象を探索することである。特に中性子星同士の連星やブラックホール・中性子星連星の衝突・合体に伴うX線突発天体を検出し、早期の近赤外線観測によりジェット・コクーン・マクロノヴァのエネルギーの変遷を捉える。これらの観測により、2020年代の天文・宇宙物理学全体の最重要テーマである「宇宙の物質と空間の起源」を深く理解することが目的である。

科学目標を達成するために、本計画では以下の流れで観測を行う

- (1) 視野1 str、検出感度10–10 erg/cm²/s (100秒積分)の広視野X線モニターで突発天体を発見する。
- (2) その後、自律制御で衛星姿勢を300秒以内に変更する。
- (3) 近赤外線帯での検出感度20.5等級 (10分露光、S/N=10)の感度を有する近赤外線望遠鏡で高赤方偏移 GRB や重力波からの電磁波対応天体を同定する。
- (4) 近赤外線観測の情報を1時間以内にアラート情報として取得し、重要なイベントに対しては地上の大型望遠鏡で迅速な分光観測を行い、目標とする物理情報を獲得する。

表. HiZ-GUNDAM ミッション要求のまとめ

	X線撮像検出器	近赤外線望遠鏡
観測帯域	0.4～4 keV	$0.5\ \mu\text{m} < \lambda < 2.5\ \mu\text{m}$
観測視野	1 ステラジアン	20 分角 (10 分角よりも十分大きい視野)
方向決定精度	5 分角 (目標 2 分角)	2 秒角
赤方偏移の測定	—	可視光・近赤外線の4色測光以上
検出感度	10–8 erg/cm ² /s (1 秒積分) 10–10 erg/cm ² /s (100 秒積分)	10 分露光で 20.5 AB 等級 (S/N=10)
アラート情報	時刻、発生座標、明るさなど	時刻、詳細な発生座標、明るさ、赤方偏移の情報
アラート時間	60 分以内	

4. 6. 2 日本の役割／海外からの寄与

本ミッションは JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画として実施するものであり、基本的には日本が責任を持ってミッションを遂行する計画である。しかしながら、ミッションをより確実に達成するための技術協力として2カ国からの国際協力を検討している。

韓国 KASI：日本側が望遠鏡光学系および冷凍機を担当し、韓国が焦点面検出器および後置光学系の開発を担当することを第一案とする。

英国 Leicester 大学：広視野X線モニターの設計・試験・科学検討を共同で行う。

4. 6. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

広視野 X 線モニターに必要な主な構成要素のうち、

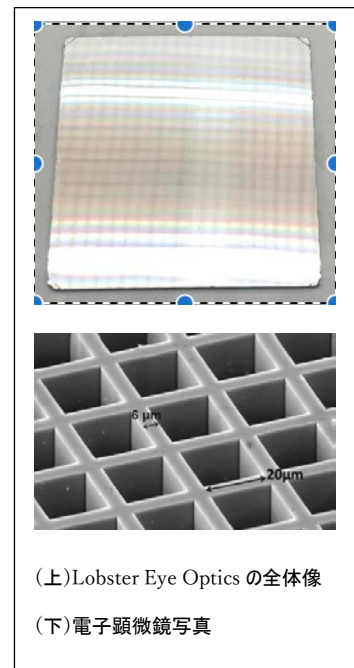
(1) 広い視野にわたって一様な有感面積を有する軽量 X 線結像光学系の開発

(2) 焦点面に配置する大型撮像検出器の開発

が主要なキー技術と位置づけられる。

(1)はガラス基板に多数の微細な四角い貫通穴を形成した Micro Pore Optics (通称:Lobster Eye Optics)と呼ばれるもので、穴の内壁を X 線反射鏡として利用するものである(右図参照)。フランスの企業で先行的な開発が行われきたが、我が国の高い半導体微細加工技術を応用し、さらに結像性能の高い光学系を本ミッションが中心となって開発している。目標とする結像性能(約1 arcmin)を達成することができれば、過去のミッションと比較して約2桁も高感度で広視野X線モニターを実現できる。

(2)は上記の Micro Pore Optics の焦点面検出器として、大きな有感領域(60 mm x 60mm 程度)と高い撮像能力(約10 μ m 角のピクセル)、そして早い読み出し速度を兼ね備えた検出器が必要であり、現在は CMOS センサーをベースラインとして検討・開発を進めている。こちらも我が国の高い半導体プロセス技術を応用し、国内で製造されたセンサーを採用する。



4. 6. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

宇宙最初の天体形成から現在に至るまでの宇宙進化を理解することは、天文学における究極の目標のひとつと言える。特に初期宇宙における星形成・宇宙再電離・重元素合成が、いつ始まり、どのような時間スケールで進化してきたかを理解することは最重要課題である。さらに、重力波源からの電磁波を介して、ブラックホールが誕生する瞬間の極限時空環境における物理現象や、ランタノイドにおよぶ超重元素合成の現場を解明することで宇宙の物質進化の全貌を理解する。

また、2023年頃には、主要な重力波観測施設である米国 LIGO, 欧州 Virgo, そして我が国の KAGRA が全てデザイン感度に到達する予定である。その時期に合わせて、重力波源の電磁波観測を推進する本格的なミッションが必要とされている。

初期宇宙探査／重力は天文学の推進の両課題において、2020年代の半ばに実現する可能性のある X 線・近赤外線融合観測ミッションとしては、世界的にも HiZ-GUNDAM が唯一であり、独自性の高い観測成果が得られると期待できる。また、本ミッションは高エネルギーニュートリノ源の電磁波観測も協力を推進することとなり、マルチメッセンジャー

天文学を強力に推進することが可能となる。これは、天文観測にとどまらず、高エネルギー物理学、原子核物理学などへも波及効果が期待できる。

4. 7 MMX

4. 7. 1 ミッション概要

MMX (Martian Moons eXploration) は世界初の火星圏からのサンプルリターンミッションである。火星衛星からのサンプル回収により、火星衛星の起源の解明、惑星形成過程と物質輸送への制約、火星圏進化史への新たな知見の獲得とともに、宇宙工学を先導する航行・探査技術の獲得を目的として掲げており、2024年度の打上げ、2029年度の回収を目指している。

MMX は、打上げの約1年後に火星圏に到達、火星衛星とランデブする。火星衛星近傍には、約3年滞在し、火星衛星や火星のリモートセンシング観測を実施する。また、火星衛星に接近・着地し、表面光学特性の異なる複数の火星衛星表面から試料を回収する。火星衛星観測終了後、もうひとつの火星衛星の観測を実施したのち、火星圏を脱出、地球への帰路につく。火星出発から約1年後に地球に到達、再突入カプセルにより地上で試料を回収する。

4. 7. 2 日本の役割／海外からの寄与

日本の役割は探査機システム、地上系を含む探査機総合システム全体の取りまとめである。海外からの寄与は、一部の科学観測機器・火星衛星ローバの開発・運用、Ka 帯通信機器の提供、海外機関所有の試験設備、地上局による支援である。

4. 7. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

日本分担分実現に必要なキー技術としては、火星圏往還と再突入カプセルによる地上での回収、高度な表面探査(試料サンプリング装置含む)、高速通信があげられる。

(1) 火星圏往還

深宇宙航行技術として、火星圏への往復は、世界初の快挙となる。はやぶさ等で実施した小天体の探査と異なり、他惑星の衛星まで往復するためには、他惑星の深い重力の井戸に入り込み、そこに滞在したのち、再びそこから脱出する必要がある。そのために大きな宇宙航行能力が必要であり、難度が高く、これまでに成功した国はない。とくに、火星表面サンプルリターンや、火星有人探査が、世界各国の大目標に位置づけられる状況において、それらに先んじて再突入カプセルによる地上での回収技術を含む火星圏への往復技術を獲得するということは、深宇宙探査の主戦場で、日本が世界の先頭に立つことを意味する。このことは、今後の深宇宙探査における国際競争においても、国際協力においても、日本に優位な立場をもたらすことになる。

(2) 高度な表面探査(試料サンプリング装置含む)

高度な自律 GNC や自律 FDIR を含む着陸誘導航法技術、表面探査、サンプリング技術について、日本の実績と技術レベルを引き上げる必要がある。深宇宙探査技術として、天体表面に到達しての探査、サンプリングは、軌道上からのリモートセンシングに対して一段上の技術と位置づけられる。はやぶさ等では、日本独自の弾丸方式によって表面試料のサンプリングを実現できる装置を開発したが、量より質を

目指し、少量でもよいので清浄度を維持して持ち帰ることに主眼を置いていた。火星衛星サンプルリターンでは量を上げるだけでなく、表層と地下の試料を採取するなどより高度な理学要求が想定され、技術レベルをより引き上げる必要がある。また、他天体の無人/有人探査においてマニピュレータ等のロボティクス技術が必須であることは自明であり、日本のロボティクス技術は他国に比べ優位であると言われているにも関わらず、探査において活躍できる場を得られていない。より高度になる表面探査、サンプリングミッションを実現するために、日本のロボティクス技術を積極的に取り入れ、技術向上および技術実証する工学的意義は非常に高いと考える。また、このロボティクス技術は探査のみならず、今後、地球周回で実用される軌道上サービスにも直結する技術であり、宇宙開発全体への寄与が期待できる。さらに、イトカワ・リュウグウより3オーダー大きな重力の天体へ着陸することから、自ずと天体表面への到達軌道は、はやぶさ・はやぶさ2とは異なり、より自然な軌道運動に沿ったものにせざるを得ない。すなわち、本ミッションの実現で、月・火星のような重力天体・大気のある天体とは異なり、かつイトカワ・リュウグウより大きな重力レベルの天体の表面への到達する技術を新たに獲得することになる。それは日本の強みである小天体探査を拡大させるものである。

(3) 高速通信

本深宇宙探査機に搭載の深宇宙通信能力を、臼田後継として計画されている新探査地上局のポテンシャルを最大限活用し、火星圏の探査活動で先行する海外機関と同等の水準へ引き上げる必要がある。深宇宙通信能力は、探査運用の自由度に直結しており、深宇宙探査機自身が自律的に判断行動する運用技術の実用により一定程度のその不利は補えるものの、本質的には通信能力自体の向上が重要である。また、海外機関に対しても、日本の探査に協力する上での障害がなくなり、共同ミッションの実施や、データ中継サービスの提供といった国際協力について対等な立場に立って推進可能となる。

4. 7. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

深宇宙探査工学に対する波及効果としては下記の点が見込まれる。

- (1) ステージ構成や運用技術などを含むシステム技術、地球＝惑星衛星間の往還を可能とする軌道誘導・航法技術を獲得するとともに、JAXAとしては初めての4トン級の大型の深宇宙探査機技術を獲得することで、将来のすべての太陽系探査の基礎能力の大幅な向上につながる。
- (2) 惑星衛星へのランデブ、惑星重力圏下での衛星周回技術に加えて、火星衛星への接近・着陸を実現することにより、小重力下(イトカワ・リュウグウ以上、月以下の重力レベル)での天体表面到達探査技術を獲得する。さらに衛星表面で長時間滞在の上帰還するというロボティクスを含む探査技術の獲得でき、将来の探査機に適用が可能である。はやぶさ・はやぶさ2の技術の直接適用が困難な10km級の天体はアステロイドベルト以遠には多く存在し、今後の小天体探査に多大な貢献を可能とする。
- (3) 深宇宙探査機の通信能力の改善およびそれを可能とする技術の実現により、通信能力がボトルネックになることの多い太陽系探査機ミッションにおいて、将来のすべての太陽系探査機のミッション遂行能力の大きな向上に資することが可能となる。

4. 8 OKEANOS

4. 8. 1 ミッション概要

ソーラー電力セイル探査機による D/P 型木星トロヤ群小惑星へのランデブー、リモートセンシングおよび搭載着陸機による小惑星表面への着陸、試料採取、その場分析を行う。また、深宇宙の長い航行期間を利用して理学観測を行う。ソーラー電力セイル(電力セイル)とは、薄膜太陽電池を多数搭載した大面積(1600m²程度;IKAROS の10倍程度)の薄膜状のセイルであり、超軽量、大電力の発電システム(4kW@5.2AU, 太陽正対;JUNO の10倍程度)である。これにより、外惑星領域においても高比推力イオンエンジン(最大7000s;はやぶさの2倍以上)の稼働が可能となり、大きな ΔV (4000m/s 以上;JUNO の2倍以上)を獲得することができる。一連のミッションシーケンスの実現により、電力セイルと高比推力イオンエンジン、着陸機による試料採取とその場分析の技術をまとめて実証できる工学ミッションである。「より遠くへ、より自在に、より多面的かつ高度な」宇宙探査活動を実現するとともに、探査技術の実践・実証による技術の不確定性の除去、信頼性の向上が見込まれ、将来的には土星圏(エンセラダス、ケンタウルス族)の試料採取を伴う探査、低コスト・高確実性な探査の実現が可能になる。理学観測はリソースが許す範囲で実施し、技術実証とともに第一級の成果を狙う。

4. 8. 2 日本の役割／海外からの寄与

着陸機の開発は DLR が担当することを前提としている。DLR は彗星探査機ロゼッタに搭載された着陸機フィラエの開発に加え、はやぶさ2搭載の着陸機 MASCOT の開発を行ってきた。特に MASCOT では JAXA のチームと共同で検討・開発を行い、ミッションも大成功を収めていることから、経験・実績ともに十分である。OKEANOS の着陸機についても、MASCOT の経験を活かした設計を狙っている。DLR とは2014年度から CE Study (Concurrent Engineering Study)を始めとする共同検討会を行っており、システム成立解を見出してきた。2015年度には共同検討に関する LOI を受けている。親機および着陸機に搭載する木星トロヤ群小惑星観測機器については、国際 AO により募集を行うことを予定している。これまでヨーロッパの多数の研究者と意見交換を行い、その中で現在までに親機に3機器、着陸機器に5機器の提案(または意向)を受けている。正式な国際 AO はプリプロジェクトフェーズで実施する。また、CNES からは2015年度に着陸機と搭載機器の国際協力に関する LOI を受けている。NASA の LUCY プロジェクトで計画されている木星トロヤ群小惑星のマルチフライバイは、OKEANOS で計画しているランデブー、着陸探査と相補的な関係であることを、LUCY 関係者との議論により合意している。ACM2017においては、LUCY の Project Scientist (K. Noll)から OKEANOS ミッションの重要性と LUCY との相補性が多数の聴衆に対して発信された。また、AGU Fall Meeting では LUCY とセッションを共催し、多数の聴衆と情報共有を行った。親機搭載の通信系について、通信レート改善に向けて NASA JPL の技術者と議論を行った。LUCY の Project Scientist である K. Noll も参加しており、通信系の議論に加えて OKEANOS ミッションの科学目標と観測内容について議論し、建設的なコメントを受けた。

以上のように、特に着陸機、木星トロヤ群小惑星の観測に関して海外の寄与するところは大きい。上述したもの以外にも国際的にワークショップ等を開催している。また、2017年度には OKEANOS International Science Review を開催し、国内外の11名の審査員から多数の建設的意見、有益な情報を得た。

日本は、電力セイル、セイル展開機構、高比推力イオンエンジン、着陸機に搭載する試料採取装置およびその場分析器(質量分析器)といったキーとなるミッション機器、およびバスサブシステムの開発、探査機システムの取りまとめを行う。なお、巡航期間中の理学観測機器は日本のチームメンバーがモデルペイロードを開発するが、搭載機器はプリプロジェクトフェーズに国際 AO により決定される予定である。

4. 8. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

上述した電力セイル、セイル展開機構、高比推力イオンエンジン、着陸機に搭載する試料採取装置および質量分析器が必要なキー技術である。そのうち質量分析器以外の技術については、ベースとなる技術はこれまでのミッションで実証されてきている。IKAROS ミッションにおいて電力セイルおよびセイル展開機構の技術のベースを、はやぶさおよびはやぶさ2ミッションにおいてイオンエンジンおよび試料採取装置の技術のベースを、それぞれ開発・実証してきている。これらは日本が牽引する小天体探査・サンプルリターン技術やソーラー電力セイル技術に関連するものであり、日本の強みであるといえる。これらの技術をさらに発展させ、ソーラー電力セイル探査機 OKEANOS として実証することで、より一層日本の強みを際立たせることになる。

日本はこれまでに外惑星領域探査の実績がない。本計画において OKEANOS のバスサブシステムを開発し、探査機システムを取りまとめることで、今後、日本も外惑星領域探査を進めていくことが可能になる。特に、通信系や熱制御系は、外惑星領域では性能向上が必要であり、本計画でこれらを実証できる意義は極めて大きい。

4. 8. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

外惑星領域での航行は電力確保が難しく、 ΔV も大きいため、フライバイ探査が中心となっている。これに対し、はやぶさでは太陽電池パネルによる電力でイオンエンジンを駆動することで小惑星サンプルリターンを切り拓いた。これを電力セイルと高比推力イオンエンジンに置き換えれば、大電力化・高比推力化を推し進めることができ、木星圏や土星圏でも着陸・試料採取・サンプルリターンが可能となる。すなわち上述したキー技術を獲得することで、ソーラー電力セイル探査機による外惑星領域の直接探査が実現でき、日本が外惑星領域探査を先導することが可能となる。さらに、ソーラー電力セイル探査機の輸送能力の高さを活かすことで、深宇宙空間での観測プラットフォームとしても活躍できる。

本計画は工学ミッションとして外惑星領域でソーラー電力セイル探査機の航行技術・探査技術を実証し、クルージング観測と木星トロヤ群小惑星でのリモート観測、その場観測を行う。工学ミッションは新しい宇宙科学・探査を切り拓くことを念頭に、技術実証だけでなく理学観測も含めた探査ミッションのシナリオを実証するものである。これにより不確定性の除去、信頼性の向上が見込まれ、将来的な探査ミッションの

コスト低減，確実性の向上を図ることができる（工学ミッションの例としてははやぶさが挙げられ，その成果を踏まえることで，はやぶさ2では十分に理学成果が期待できるミッションとなっている）。こうした工学ミッションによって探査を実現していくことが，海外と比較し予算が限られている日本が宇宙探査・科学の分野で世界を牽引する最善の手段であり，これを成功させることで世界第一級の宇宙科学成果が得られる。

以下のように個別技術としては，電力セイルは大規模宇宙構造分野（宇宙太陽発電衛星システムを含む），高比推力イオンエンジンは電気推進分野の従来技術を飛躍的に発展させることができる。

電力セイル：大面積（1600m²程度；IKAROS の10倍程度），大電力発電（4kW@5.2AU，太陽正対；JUNO の10倍程度）

高比推力イオンエンジン：高比推力（最大7000s；はやぶさの2倍以上），大きな ΔV （4000m/s 以上；JUNO の2倍以上）

4. 9 SLIM

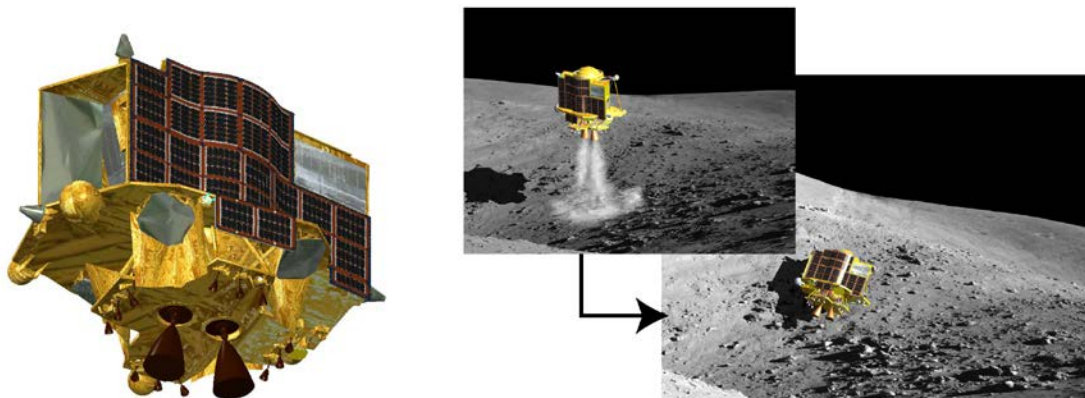
4. 9. 1 ミッション概要

小型月着陸実証機“SLIM”ミッションは、今後の月惑星着陸機に求められる高精度着陸技術を、小型軽量の探査機による月面着陸により実証するミッションである。2016年より JAXA 機構プロジェクトとしての活動を開始しており、現在、2021年度の打上を目指して開発が進められている。なお打上は、H-IIA ロケットによる「XRISM」衛星との相乗り打ち上げとして、実施される計画である。

これまでの月面着陸機における着陸精度（誤差楕円）は、概ね数 km～10数 km であり、そのため、広い領域に渡り平坦・安全な地形（一般に“海”と呼ばれる）を選んで着陸する戦略が採用されていた。一方で、JAXA の「かぐや」衛星や、NASA の「Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)」衛星などが大量の高分解能観測データをもたらしたことなどから、今後は、例えば科学的にユニークなクレータ近傍に着陸して地質調査を行う、あるいは、極域の永久日照領域に着陸して近接する永久日陰領域で水資源探査を行う、といったミッション検討が主流となってきた。このようなミッションを実現するためには、典型的には、100m 級の着陸精度を実現する技術（“ピンポイント着陸技術”）が必要となるが、諸外国含め、これを有重力天体で実現した例はない。

SLIM ミッションは、ピンポイント着陸技術実証と、これに伴う小型軽量の探査機システムの開発を2つの柱として提案され、認められた計画である（ボトムアップ型）。SLIM 着陸機はハードウェア部分の質量（ドライ質量）を約200kg 程度として計画されており、従来の月着陸と比べると、大幅な軽量化を目指している。その実現のための要素技術は、将来の月惑星探査機の小型化・高頻度化に資するものである。

SLIM ミッションの主目的は、上記の通り小型軽量着陸機によるピンポイント着陸技術実証であるが、着陸成功後には、小型の科学観測機器による地質分析も行う予定である。この観測により、月起源の解明に繋がる重要な手がかりが得られることが期待されている。同時に、この科学観測はピンポイント着陸技術を前提とするものであり、その意味で、SLIM が拓く新しいミッションの具体例ともなっている。なお、SLIM ミッションの着陸地点は、この地質分析による成果が見込まれる候補地点の中から、ピンポイント着陸技術実証に適した場所を選択して、選定されている（“神酒の海”付近のあるクレータ近傍）。



4. 9. 2 日本の役割／海外からの寄与

SLIM ミッションは現在のところ JAXA が単独で行うプロジェクトであり国際協力の計画はない。

4. 9. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

月のような有重力天体で100m 級精度のピンポイント着陸を達成するためには、地上からの軌道決定・誘導ではなく、探査機自身による精密航法誘導制御が必要となる。SLIM ミッションでこれを実現するためのキー技術は、大きく分けて2つある。1つは、搭載された航法カメラによる月面画像をオンボードでクレータ地図と照合し、正確な位置・速度を検出する「画像照合技術」である。その実現にあたっては、宇宙機に搭載可能な処理装置でほぼリアルタイムな照合を実現することなどがポイントとなる。また、得られた画像照合航法値にもとづき、軌道を修正しながら着陸目標地点に向かう「自律的な誘導制御技術」が、もう1つの重要な開発項目となる。なお、このような画像ベースの航法誘導制御技術により月惑星に着陸した例は、これまで知られていない。

小型軽量の探査機システムの実現にあたっては、推進タンクを主構造の一部とするというシステム設計上の工夫の寄与が大きい。加えて、小型軽量の着陸衝撃吸収機構、高効率な国産メインエンジン、太陽電池セルやバッテリー等の軽量化などが、重要な要素技術である。

なお、将来ミッションがピンポイント着陸を前提として計画される場合、その着陸目標地点は一般に、“海”のような平坦地ではなく、起伏の飛んだ地形やクレータ近傍の傾斜地などであろうと考えられる。実際、着陸後の地質分析も鑑みて選定した SLIM ミッションの着陸目標地点は斜度15-20度程度の傾斜地であり、そのため、小型軽量機体によりこのような傾斜地に安全に着陸するための着陸方式（“2段階着陸方式”）が採用される計画である。

4. 9. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

SLIM がもたらすピンポイント着陸技術は、今後の月惑星着陸ミッションに対して、従来の「降りたいところへ降りる」着陸から、「降りたいところに降りる」着陸への、質的な転換をもたらすことになる。それは、今後の科学・探査ミッションにおいて、その関心ある目標に対するダイレクトなアクセスを可能とするということであり、また、これまで着陸安全性の観点から目標地点とし難かった地域（起伏や日照条件等により、着陸可能領域が狭い範囲に限定される地域）へのアクセスを可能とするということである。それはいずれも、今後の科学・探査ミッションに新しい可能性を拓くことに繋がる。実際、SLIM の着陸目標地点は、月起源に迫る観測成果が見込まれる地点として選択されているが、そもそもピンポイント着陸技術がなければ着陸困難な地形であることから、ピンポイント着陸技術が拓く着陸探査の可能性を示す好例ともなっている。ピンポイント着陸技術は、ミッション毎に固有の条件に応じて、センサハードウェアや画像照合方式を適応させる必要はありえるものの、基本的には普遍的な技術であり、今後の様々な有重力天体への着陸ミッションに適用可能な技術である。また、小型軽量化のための各技術はそれぞれ、今後の月惑星探査の高頻度化に貢献する技術である。

4. 10 DESTINY+

4. 10. 1 ミッション概要

DESTINY+は、工学と理学が連携した挑戦的な実証ミッションである。イプシロンロケットで地球周回長楕円軌道に投入され、電気推進での加速と月スイングバイにより地球圏を脱出し深宇宙に至ることで、従来よりも遥かに低いコストで深宇宙探査を実現する。これに必要な複数の工学技術の実証が、工学的な眼目である。また理学的には、地球生命の種となり得る宇宙塵(ダスト)の供給源の一つ、小惑星 Phaethon にフライバイを行い、地球飛来ダストとその供給源の実態解明を目的とする。

4. 10. 2 日本の役割／海外からの寄与

DESTINY+での技術開発の主要項目は、次代の標準となる深宇宙探査バス技術、理学観測を行うカメラ2台とダスト分析器である。深宇宙探査バス技術開発は JAXA が取りまとめ、世界を先導する柔軟・高性能かつ低コストなバス開発を目指す。カメラ開発は千葉工業大学が取りまとめ、駆動鏡を備えた超望遠カメラと、小型軽量の多波長帯カメラを開発する。ダスト分析器は、ドイツ航空宇宙センター(DLR)の資金提供の元、ドイツ Stuttgart 大学が取りまとめて開発する。これに先立ち、2017年9月に JAXA・ドイツ航空宇宙センター(DLR)間で機関間会合を実施し共同声明が発表されたのち、同年10月には実施取り決め(Implementing Arrangement)が締結された。

4. 10. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

イオンエンジン: 比推力3000s、単体推力12mN の日本独自の長寿命方式であるマイクロ波放電型イオンスラスタを最大で4台同時に運転できるイオンエンジンシステムを開発する。この中で「はやぶさ」で8mN、「はやぶさ2」で10mN であった最大単体推力に関してさらに改良を加えたうえで、同時運転台数を従来の3台から4台に増やすために必要な熱設計を見直す。これにより「はやぶさ2」までに要求された増速2km/s を大きく上回る4km/s の増速能力を500kg 級の小型探査機に提供する。

軌道計画: イプシロンロケットによる地球周回軌道投入後、イオンエンジンにより加速してスパイラル状に高度を上げて月に会合させ、複数回の月スイングバイにより地球重力圏を脱出し深宇宙に至る技術。例えばスパイラル軌道設計では、推進消費量、飛行時間、最大日陰時間を目的関数とした多目的最適化を行い、初期軌道分散などの誤差要因を考慮したローンチウィンドウの解析などを可能にする。

薄膜軽量太陽電池パドル: 高効率な薄膜太陽電池セルと、軽量なフレーム構造の組み合わせにより、パドルレベルの出力密度を約100W/kg と従来の2倍程度、世界最高レベルに引き上げる技術。500kg 級の小型探査機に搭載可能な小型軽量の太陽電池パドルで、イオンエンジンを運転する kW 級の発電を可能にする。

先進的熱制御デバイス: DESTINY+は、日照/日陰の存在する地球周回軌道や、太陽距離の大きく変化する深宇宙において、イオンエンジンを運転する。スラスタに太陽光が直射した状態でイオンエンジンを運転するホットケースでの排熱や、日陰中にイオンエンジンを停止し熱源を失うコールドケースでの保温

を、限られた放熱面積で効率的に行うため、ループヒートパイプと可逆展開ラジエータを活用する。ループヒートパイプは、自由な熱輸送経路の構築や可動部への適用が可能。可逆展開ラジエータは、開閉可能な放熱面により、効率的な排熱とヒータ電力削減を両立する。

高速フライバイ撮像：Phaethon フライバイ時の相対速度は、30km/s 以上に及ぶ。その最中に小惑星を視野に捉え続けかつ画像ブレの少ない光学観測を行うため、探査機姿勢制御と駆動鏡の回転を組み合わせ、小惑星追尾を行う。フライバイの時間スケールは探査機・地球間の通信遅延より遥かに短く、探査機は全ての制御を自律的に行える必要がある。

理学観測カメラ：DESTINY+は、幅広い太陽位相角において高空間分解能でフライバイ対象天体の地形観測を行う焦点距離約1000mm の駆動鏡付きの超望遠カメラと、6つの波長帯を同時観測できるマルチバンドカメラを搭載する。短いフライバイ時間中に最大の観測成果を得るため、カメラごとに1フレーム/秒以上で撮像を行いデータを格納しつつ、小惑星追尾制御に対してもフィードバックを行う。マルチバンドカメラを搭載する。短いフライバイ時間中に最大の観測成果を得るため、カメラごとに1フレーム/秒以上で撮像を行いデータを格納しつつ、小惑星追尾制御に対してもフィードバックを行う。

4. 10. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

イオンエンジン：イオンエンジンを含む DESTINY+のバスが将来の電気推進搭載小型深宇宙探査機バスのベースの一つとなり開発費用の削減が期待される。性能向上されたサブシステムやコンポーネントは他の小天体探査ミッションなどでも再利用が可能で、深宇宙探査の到達範囲の拡大に貢献する。また、宇宙科学以外の分野では、デブリ除去衛星、超低高度衛星、小型静止衛星、測位衛星などの地球周回衛星への応用・商業利用の波及効果が期待される。

軌道計画：様々な地球周回軌道から月高度や深宇宙への到達、さらには軌道間輸送や惑星周回軌道投入といった、柔軟な軌道設計が可能になる。また、イプシロンロケットや GTO 衛星相乗りといった幅広い打ち上げ手段を活用し、柔軟性と低コスト化を両立可能。

薄膜軽量太陽電池パドル：高い出力密度 (W/kg) と、収納性の実現により、小型探査機への大電力機器搭載や、外惑星探査機に必要な大型パドルの重量削減が可能となる。また、重力天体着陸機や、火星飛行機のような、軽量化が特に重要なミッションにも有効。

先進的熱制御デバイス：熱入力の大きな変化や大発熱機器の運転/停止に対し、限られた放熱面積で対応する柔軟な熱設計が可能になる。地球周回機はもちろんのこと、低リソースな深宇宙や惑星探査機の実現や、機器配置等の設計の自由度向上に寄与する。

高速フライバイ撮像：相対速度数十 km/s の高速フライバイ観測が可能になることで、観測可能天体が大きく拡大する。一例として、Phaethon のような流星群母天体に対するフライバイ速度は20～70km/s になり、こうした天体の観測が可能になる意義は極めて大きい。

理学観測カメラ：焦点距離1000mm で駆動鏡を備えた超望遠カメラは5kg、6波長帯のマルチバンドカメラは2.5kg という低質量での開発を進めており、多様な将来ミッションに応用が可能である。

4. 11 JUICE

4. 11. 1 ミッション概要

木星氷衛星探査計画(JUICE)は、欧州宇宙機関(ESA)の基幹ミッションである。木星周回軌道から木星系の観測(磁気圏、木星大気、エウロパ・カリストのフライバイ観測)を実施し、世界初の氷衛星周回機となって太陽系最大の氷衛星ガニメデの総合観測を実施することで、以下の理解・解明を目指す。

1. 「惑星はいかにして作られたのか？」

太陽系以外にも適用できる普遍的な惑星形成論を構築し、太陽系形成論を見直す。

2. 「地球の外に水の世界はあるか？」

氷衛星の地下海、生命誕生につながる高分子が生成する環境が作られる条件を探る。

3. 「太陽系で起きている環境の変動にはどのようなものがあるのか？」

木星(JUICE)、水星(MMO)、地球(ARASE)のプラズマ過程を比較を行うことで、宇宙のプラズマ過程を理解する。

4. 11. 2 日本の役割／海外からの寄与

JAXA は、11の搭載観測機器のうち、我が国が実績と技術的な優位性を持つ3つの機器(電波・プラズマ波動観測装置(RPWI)、高速中性粒子観測装置(PEP/JNA)、ガニメデレーザ高度計(GALA))についてハードウェアの一部を開発・提供するとともに、2つの機器(カメラシステム(JANUS)、磁力計(J-MAG))のサイエンス共同研究者として参加する。

4. 11. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

中性粒子質量分析用時間差計測集積回路(Time to Digital Converter: TDC) (PEP/JNA)
PEP/JNA では中性粒子の質量分析のために、粒子が飛行する時間(Time Of Flight: TOF)を測定する。このために必要となる、数ナノ秒程度の時間分解能の時間差を計測する集積回路の開発が必要となる。近年技術の進歩が著しい耐放射線性を持つ FPGA を利用し、内部に構成する論理回路のみで3ns 以下の分解能の時間計測が可能な新しい TDC を開発する。TDC は日本が強みとしている粒子の質量分析において必須のデバイスであり、本 TDC を開発することで将来的にも日本が優位性を保つことが可能となる。

光検出素子 APD(Avalanche Photo Diode)検出器信号の高速処理技術(GALA)

GALA ではレーザー光をガニメデ表面に向けて送出しガニメデ表面で反射した光を受光するまでの時間を計測することでガニメデ表面と衛星の距離を測定する。このレーザー光を受光するための素子が APD であるが、APD の温度制御、受信信号のゲインコントロールや、複数の ADC を使用したデータサンプリング回路など検出器信号の高速処理回路の開発が必要である。開発においては、レーザー送出部から

の電磁ノイズの干渉も受けないような設計とすることも重要である。本技術開発を行うことで将来日本が独自に惑星探査用レーザー高度計を作る際に必要となる技術を得ることができる。

後置光学系・検出器モジュールの光学・熱・機械系開発(GALA)

GALA の BEO(後置光学系)および FPA(焦点面モジュール、APD 検出器を含む)の光学・熱・機械系の開発は挑戦的開発課題である。受光望遠鏡の熱歪み等の発生を抑制するのと両立して、後置光学系の性能、および APD 検出器の温度制御、排熱を GALA の責任機関であるドイツ DLR 担当部分とのインターフェースを成立させつつ、非常にコンパクトな領域で実現する必要がある。本技術開発を行うことで、将来日本が独自に惑星探査用レーザー高度計を作る際に必要となる技術を得ることができる。

耐低温・耐高放射線性能を有する波動受信用プリアンプ(RPWI)

RPWI の高周波波動受信機プリアンプは、必要となる周波数範囲(80kHz - 45MHz)で十分な低ノイズ特性(10MHz 以上で入力換算 $<10 \text{ nV/Hz}$)・Gain (10dB 以上)を確保できる必要がある。また、探査機外に展開されるため、400-1000krad の耐高放射線性と、 $> -150\text{degC}$ の耐低温性が要求される。本技術開発を行うことで、将来の外惑星ミッションに向けて放射線環境が厳しくかつ極低温環境に耐えるハードウェアの開発技術を得ることができる。

4. 11. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

JUICE ミッションへ参加して上記技術を獲得することで、以下の技術的意義・波及効果がある。

木星ミッションは、放射線環境が厳しくかつ極低温環境である。その環境に耐えるハードウェアの開発は、将来の我が国独自の外惑星ミッションへの知見を得ることに直結する。

ISAS の衛星では、ミッション期間が1-3年と短いものが多いが、JUICE の場合は、11年をこえるミッションになる。また ESA は、標準として3-5モデルを製作し、部品・材料からシステムまでの認定試験(QT)を実施することで、品質・信頼性を向上させ、長期間の運用に耐えるハードウェアの開発を可能としている。今回そのノウハウを学ぶことで、将来の長期ミッションへの知見を得ることができる。

JUICE ミッションでは、日本側が提供するハードウェアに対し、ESA の探査機に関する製品保証要求の実施が求められている。そのため、ESA の設計/製造保証要求がどのように実践されるのかを知ることが可能になり、これは今後の ESA との衛星・探査機／搭載観測機器等の共同開発時に役立つものである。

4. 12 CAESAR

4. 12. 1 ミッション概要

国際共同彗星サンプルリターンミッションである CAESAR 計画は、NASA の大規模惑星探査プログラム(1000億円規模)の New Frontiers Program 4において、ファイナリストミッションに選出されたミッションである。PI をコーネル大学が担い、NASA-GSFC, NASA-JSC, ESA, Northrop Grumman, Honeybee などが参加している。CAESAR 計画では、ESA のロゼッタ探査機が着陸機フィラエを投下するなどの探査を行った「チュリモフ・ゲラシメンコ彗星」について、その彗星核から、固体物質に加え、揮発性物質(氷等)を一度も溶かさずに地球に持ち帰ることを目指している。この回収試料を、「20年後の最新の分析機器」を用いて分析することにより、太陽系や生命の起源の謎の解明につながると期待されている。

具体的には、ゲラシメンコ彗星の固体試料と揮発性物質の両方から得られる情報として、以下に繋がる知見が得られると考えられる。

1. 太陽系の水の起源
2. 円盤外縁部における星間物質から太陽系物質への変化
3. 円盤内部で形成された高温物質の輸送の規模と年代に対する制約
4. 低分子化合物の生成領域に制限
5. 初期地球への生命関連有機物の供給

4. 12. 2 日本の役割／海外からの寄与

「米国 CAESAR チームからの要請」を受け、JAXA 宇宙科学研究所は、2015年9月からこの活動に参加した。JAXA が担当することが期待されているのは、CAESAR ミッションの成立に必須な中核的バス部分であるサンプルリターンカプセル(SRC)である。そのほか、SRC を探査機から分離する機構、回収試料を内蔵したパイロードをカプセル内部へ搬送するための機構、そして、それらの支持構造を担当する。CAESAR 探査機本体は米国が担当する。

また、日本の科学者も、本ミッションの計画立案に深く貢献しており、すでに理工学両面からの強い協力関係が構築されている。

4. 12. 3 日本分担分実現に必要な技術開発、キー技術、日本の強み技術

CAESAR-SRC の開発では、「はやぶさ」の SRC ヘリティジを最大限活用する。特に、CAESAR の大気圏突入条件で使用可能で、実績があり、現在製造可能な耐熱材料(アブレータ)は、世界では「はやぶさ」のアブレータのみであることから、日本の強み技術と言える。

「はやぶさ」では直径40cmだった SRC について、直径1m 超・質量200kg 超ともなる大型化技術、特にそれに伴うヒートシールド構造(アブレータ製)やパラシュートシステムは、技術開発が必要である。また、回収試料を低温保持しつづけるための、ミッションを通しての正確な熱解析と熱設計の技術は難易度が高い。そのほか、回収試料のカプセル内部への搬送機構は、大型かつ高信頼性の機構部であり、技術開

発要素が多い。

一方で、CAESAR ミッションから SRC へのこれらの技術要求は、将来のサンプルリターンミッションの鍵となる要求を含んでおり、将来を見据えた挑戦的な技術要素であると言える。

4. 12. 4 上記技術を獲得することで切り開かれる日本の宇宙科学、波及効果

「はやぶさ」の成功によって、太陽系探査におけるサンプルリターンミッションの意義・価値は、世界に認められた。サンプルリターンは、世界的に今後の探査ミッションの一つの柱になっており、日本はこの分野で（工学的にも、理学的にも）世界をリードしている。NASA のフラッグシップミッションである CAESAR 計画への SRC 担当としての参加によって、日本が今後もこの分野でのプレゼンスを示すことが出来る。

また、JAXA では、SRC 技術を洗練・発展させ、より高度なサンプルリターンカプセルによって世界を牽引しようとする戦略がある。具体的には、「はやぶさ」「はやぶさ2」相当の小型カプセル（直径40cm 級）、MMX で開発する中型カプセル（直径60cm 級）、CAESAR の大型カプセル（直径1m 超）というラインアップ化によって、さまざまなサイズでの SRC 技術で世界のサンプルリターン計画を先導することが可能となる。

一方で、CAESAR 計画そのものにおいては、彗星からの回収試料について、初期分析サンプルの半分に日本の科学者が関わる予定となっており、開発費用負担比率を大きく超えての科学的関与を可能とする見込みである。これは、ミッション達成に必須の中核的バス部分に、請われて参加することによって導かれるメリットであり、強みある技術の獲得による波及効果を示すものである。

5章 まとめと今後

コミュニティを中心としたミッション推進を基本としつつ、かつ、ミッションが大型化・高度化する中で我が国の宇宙科学計画を持続的に発展させるためには、ミッション群の段階的实施により技術をステップアップさせるための「プログラムの」戦略が不可欠である。本稿では、4章にて今期中期計画にて実施するプロジェクトのために重要技術について記述するだけではなく、2章では太陽系科学、天文・宇宙物理学、宇宙工学の各分野について、世界的潮流、我が国が目指すべき方向、そこに向けて持続的発展を遂げるためのシナリオを提示し、3章では長期的に投資すべき課題をある程度絞り込みその上で天文学宇宙物理学・宇宙工学・太陽系探査の3分野において、次の4項目のいずれかに相当する重要技術を識別し、宇宙科学ミッションとの関連と技術の研究開発方針について記載した。こうした整理により、直近技術の大半が2030年以降の将来宇宙ミッションにおいても重要技術として識別され、これら継続的に発展させることで将来の宇宙科学ミッションを支えていくことが可能であり、そのための戦略的で継続的な技術開発が重要であることが示された。

3章で識別された網羅的な重要技術から優先度の高い技術開発を戦略的に選抜し、これを着実かつ quick に実施するための技術開発(=フロントローディング研究の強化)が、「プログラムの」戦略には不可欠である。3章では、次の4項目：

- A)日本が実施する特徴ある科学ミッションを実施する上で必須となる、世界初の技術
- B)従来から日本が強みを持った技術であり、さらなる技術開発によって飛躍的な科学成果が得られるもの
- C)国際協働探査へと接続・発展することが期待され、将来の基盤技術となるもの
- D)宇宙科学の枠組みを超え、宇宙開発全般、あるいはその他の分野において革新的でステップ的な発展につながるもの

に当てはまる技術をリストアップしたが、各項目の中でも優先度が高いと考える次の技術開発の実施に向けて、宇宙科学コミュニティと ISAS とが強い連携と分担の元で技術開発を推進して次世代のミッション早出のための基盤形成を急ぐ必要がある。

- 宇宙用冷凍機技術(1K/20-100K 冷凍機とその大型化)
- 編隊飛行技術(測距、安定飛行技術の小型実証)
- 宇宙輸送システム技術(飛翔システム開発技術)
- 月惑星探査機技術(電気推進、薄膜太陽電池、低消費電力、小型軽量コンボ・バス技術、ランダー、天体相対自律画像航法技術)
- 天体表面活動技術(ローバー、サンプルリターンカプセル)
- 超小型探査機(超小型衛星システム技術)