

コミュニティからの目標・戦略・工程表 から,
宇宙科学の実行戦略へ

version 0.16a

宇宙科学・探査プログラム検討チーム
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

2016 年 6 月 6 日

目 次

第 1 章 序・経過	1
第 2 章 戦略立案の基本的な考え方	3
第 3 章 各分野の実行戦略	6
3.1 宇宙物理学分野	6
3.1.1 戦略的・優先的に進めるミッション	6
3.1.2 競争的にすすめるミッション	7
3.1.3 戦略的な技術開発	8
3.2 惑星科学分野	8
3.2.1 戦略的・優先的に進めるミッション	8
3.2.2 戦略的な技術開発と進め方	9
3.3 太陽・太陽圏科学分野	9
3.3.1 戦略的・優先的に進めるミッション	9
3.3.2 競争的にすすめるミッション	10
3.4 宇宙工学分野	10
3.4.1 宇宙工学の状況分析ならびに戦略構築の考え方	10
3.4.2 宇宙工学の戦略	11
3.4.3 宇宙航行・宇宙輸送分野の目標と、今後 20 年の計画	11
3.4.4 衛星・探査機分野の目標と、今後 20 年の計画	12
3.5 宇宙環境利用科学分野	13
3.5.1 戦略構築の考え方	13
3.5.2 宇宙環境利用科学の戦略	13
3.5.3 微小重力科学の今後 20 年の計画	13
3.5.4 宇宙生命科学の今後 20 年の計画	13
第 4 章 宇宙科学ミッション工程表	14
第 5 章 まとめ	16
付 録 A 各コミュニティからの目標・戦略・工程表の 1 枚まとめ	17
A.1 宇宙物理学分野	17
A.2 惑星科学分野	18
A.3 アストロバイオロジー分野	19
A.4 アストロケミストリー分野	19
A.5 太陽・太陽圏分野	20
A.6 宇宙工学分野	20
A.7 宇宙環境利用科学分野	21
付 録 B 宇宙物理学	22

B.1	目標・戦略・工程表	22
B.2	記述されているプロジェクト	22
B.3	戦略的に進めるプロジェクト設定の基本な考え方	22
B.4	宇宙の物質と空間の起源	25
B.4.1	宇宙の一様性, 平坦性, 構造形成の起源	25
B.4.2	揺らぎの種からバリオン物質の織りなす現在の多様な宇宙に至る構造形成	26
B.5	宇宙における生命の可能性	28
B.5.1	惑星系形成	28
B.5.2	直接撮像によるバイオマーカー探査	28
B.6	宇宙物理学分野の優先度付と工程表	29
B.6.1	戦略的に進めるべきミッション	29
B.6.2	戦略的に進めるべきミッション以外のミッションの考え方	30
B.7	まとめ	30
付 録 C 惑星科学		33
C.1	目標・戦略・工程表	33
C.2	記述されているプロジェクト	33
C.3	惑星科学の目標	33
C.4	惑星科学の優先するプロジェクトと戦略	35
C.5	搭載機器の戦略的開発	35
付 録 D アストロバイオロジー・ケミストリー		38
D.1	目標・戦略・工程表	38
D.2	他の分野の目標・戦略・工程表とアストロバイオロジー目標・戦略・工程表	38
D.3	アストロバイオロジーの目標・戦略・工程表	38
D.4	サイエンス目標	38
D.5	戦略的なすすめ方	41
D.6	まとめ	41
付 録 E 太陽圏科学		43
E.1	目標・戦略・工程表	43
E.2	記述されているプロジェクト	43
E.3	太陽圏科学分野の目標	43
E.4	優先付けと戦略	45
E.5	まとめ	45
付 録 F 宇宙工学		46
F.1	目標・戦略・工程表	46
F.2	工学コミュニティから提案のあったミッション一覧	47
F.3	宇宙工学ミッション（案）	47
F.3.1	宇宙科学ミッション	47
F.3.2	JAXA 輸送系プログラムと、将来宇宙輸送系を支える小規模プロジェクト	51
F.3.3	小型・超小型衛星プログラムとその出口戦略	51
F.4	宇宙工学の課題	51
F.5	宇宙工学分野の将来構想と実行戦略（案）	52
F.5.1	宇宙工学の状況分析ならびに戦略構築の考え方	52
F.5.2	宇宙工学の戦略	53

F.5.3	宇宙航行・宇宙輸送分野の目標と、今後20年の計画	53
F.5.4	衛星・探査機分野の目標と、今後20年の計画	54
F.6	今後の進め方	54
F.Appnedix1	宇宙工学ロードマップの概要（2015年3月版）	55
F.Appnedix1	宇宙工学における技術開発	57
付 録 G	宇宙環境利用科学	58
G.1	目標・戦略・工程表	58
G.2	宇宙環境利用科学の特殊性	58
G.3	宇宙環境利用科学の大目標と post ISS のすすめかた	59
G.4	post ISS に推進する研究と戦略	59
G.5	まとめ	60

第1章 序・経過

宇宙科学の今後の実行に向けて、米欧を含む世界の宇宙活動の中でこれまでに確立された日本の宇宙科学の地位と役割、および長年の活動によって培われた実行能力や体制に立脚し、新たな飛躍をもたらすための実行戦略や、それに基づく実行計画の立案についての議論が活発に行われている。これらの議論は、この数年新たな宇宙開発の基本計画や工程表の策定などの中で、日本の宇宙科学の実行の在り方と併せて、その実行を担う宇宙研と、それを取り巻く学術研究コミュニティの議論を踏まえて行われている。この報告では、今後の20ないし30年を視野に入れた方向性の提示と実行戦略の具体化について述べる。

これまでの宇宙科学の実行は、宇宙科学研究所に設置された宇宙理学委員会および宇宙工学委員会において、新規ミッションの発掘や提案の募集と採択およびプロジェクト化に向けた支援とプロジェクト実行と評価、というサイクルで、ボトムアップのいわゆる競争的環境を機能させることで、行われてきた。その際、どのような分野のミッションをプロモートするかは各分野の研究コミュニティの自主的な判断に委ねられ、よいミッション提案をしたものが結果として実行にまで結実するという形で、よいミッションを作るあるいはその時点での最適な選択をする、というインセンティブが働いてきたといえるであろう。

この方法は、よいミッションを創出するための大きな必要条件の一部を占めることは論を待たないのであるが、他方で、この方法では、戦略性をもって長期の計画を立案することや、何を次の大きな目標にする、などと言うメッセージを陽に顕在化させたり外部や社会に発信したりすることがしにくいシステムである事も事実である。さらには日本の宇宙科学が、全体としてどこに向かおうとしているかの発信を求められる状況に対しては、機能し得ていないとの指摘にもつながっていることも事実であろう。こうした指摘に答えるためには、宇宙科学における長期計画を、より具体化されたミッション候補と工程表として具体的に示して発信していくことが重要である。

一方で、宇宙科学全般については、数年とか10年などという、ある程度の期間より長い時間の進展は、予め予定されている形で発展するのではなく、この間の新たな発見や新規技術の登場が次の予期せぬ展開をもたらす、あるいは理論の進化および地上望遠鏡やその他の宇宙への飛翔手段を用いる方法以外の発展によって変革を迫られる、などと言ったことに十分配慮すべきである。新しいミッションの創出に際して考えるべき状況変化や学術の進歩に対する柔軟な対応が必要であって、予見性を持った長期にわたる戦略を発信することと、その時点で最適な選択を競争環境を機能させてボトムアップのスキームを機能させて行うこととの高度な両立を目指すのであろう。

ここで述べる内容は、このような考えに基づき2013年以来議論が始められた宇宙科学ロードマップの策定あるいは戦略的実行の具体化を考える中で、2014年後半に行われた、コミュニティに対するその分野の戦略的実行の考え方を集約するための「研究領域の目標・戦略・工程表提供のお願い」¹の求めと、それに対する回答を参考に、「研究領域の目標・戦略・工程表提供のお願い」への回答から抽出した考えを参照しつつ、日本の宇宙科学の戦略として提示するものである。

この「研究領域の目標・戦略・工程表提供のお願い」の送出は2014年末に行われ、その範囲は宇宙理学および宇宙工学委員会の研究班員に対して行われた。回答は2015年1月末に締め切られ、各研究分野の42のコミュニティから39件の回答が提出された。添付資料に整理されており、これらを集計整理した後、2015年6月に本検討チームに対して、宇宙科学の実行戦略への転換のタスクがチャージされたものである。

¹いわゆる RFI (Request for Information)

ここで述べる戦略への転換にあたっては、「研究領域の目標・戦略・工程表提供のお願い」への回答を参照し反映するものの、宇宙研としての独自の戦略としてまとめることを意図して行われた。これは、宇宙理学委員会ならびに宇宙工学委員会におけるこれまでの概要的なロードマップ議論から一歩進めて、宇宙科学研究所からコミュニティへと具体的な戦略を提示するという点において、新しい試みである。コミュニティからの回答のカバレッジの不足や偏りは、回答者とのコミュニケーションを通じて、あるいは日本の宇宙科学としての戦略的重点化の考えや、国際的な日本の役割と国際間の補完、これまで、あるいは今後に予想される多様な研究分野の成長と中心的課題の変遷などの周辺状況の変化に柔軟に対応することにも留意した。また、現実的なリソースの制限、成果創出のインパクトと頻度とタイミングなどなどの多岐にわたる事柄など広範囲の考察をおこない、これらを踏まえて、戦略へと転換したものである。

宇宙科学研究所 宇宙科学・探査探査プログラム検討チーム

チーム長

稲谷芳文 副所長

チーム員

満田和久 研究総主幹

久保田孝 宇宙科学 PD

紀伊恒男 SE 推進室長

上野宗孝 CE/PO 室長

佐々木宏 科学推進部長

藤本正樹 教授

橋本樹明 教授

稲富裕光 教授

羽生宏人 准教授

津田雄一 准教授

尾崎正伸 准教授

山田亨 教授

船木一幸 准教授

第2章 戦略立案の基本的な考え方

宇宙科学研究所が実施する宇宙飛翔体を用いて行う日本の宇宙科学は、地球周回軌道やラグランジェ点など宇宙空間からの宇宙空間や太陽系空間の観測、および惑星間空間や月惑星・小天体表面などへの到達探査により、地球と太陽系の起源、宇宙の物質と空間の起源、宇宙における生命の可能性探求に、新しいパラダイムをもたらすような人類の知の創出とそれを可能なら占める工学技術による先導を目指し、同時に探査機・輸送システム等の宇宙工学技術をパラダムシフト的な革新をもたらすことをその目的としている。その成果は人類の活動領域の拡大を含む我が国および世界の宇宙開発全体への貢献および知的資産の獲得に資するものである。

これまでの日本の宇宙科学において行われた様々な実績と特徴を生かし、これらを更に伸張させるための戦略的な推進と、ボトムアップによる競争的環境の健全な維持発展の両立を図り、大学を中心とした理学および工学研究コミュニティと一体で以下の課題に取り組む。

1. 宇宙・物質・空間は何故できたのかの解明
2. 太陽系と生命はどの様に生まれて来たかの解明
3. 衛星・探査機などの宇宙機システムおよび宇宙輸送システムに関わる宇宙工学技術の先導および革新
4. 人類の活動領域を広げる研究開発

限られたリソースの中で、大学共同利用のシステムを効果的に活用して、これらを実現するために、以下の基本的な方針に基づいて実施する。

- 世界を先導する事が期待されかつ実行可能な分野においてはフラッグシップ的ミッションを戦略的に進める。一方で小型低コスト・高頻度かつ機動的な宇宙科学ミッションを持続的に実行する。その際、日本の基幹輸送システム（H 2，3およびイプシロンロケット）の高度化と密接な連携のもとに検討を進める。
- 米欧日三極間での国際協調と相互補完により効率的なミッション計画を立案し実行する。その際、戦略的に日本が独自に実行する、国際間で計画を主導するもの、および米・欧の主導するミッションに参加する形態など、多様な実行の方法を指向する。
- 宇宙科学の保有する小型飛翔機会の活用とその発展、および海外も含めた多様な飛翔機会などの積極的活用により、限られたリソースで成果創出の最大化を図るための方策を模索する。

これらの方針に基づき、宇宙理学および工学の学術研究各分野の現状、およびこれらに対応した実行方策を、以下に述べるような考え方と、世界における宇宙科学の進展の状況認識および日本の宇宙科学における様々な課題認識に基づいて推進することとする。

- 1) 天文学・宇宙物理学分野は、既にX線天文学などのような望遠鏡型衛星による観測ミッションでは大型化・巨大化の流れの中で、上記三極においても一国のみで計画の推進をすることは困難になっている。また新しい分野として初期宇宙の解明のための偏光観測や重力波など新しい手法による観測、系外惑星の生命探索などの新たな分野の創生の試みなど、従来型のミッション立案お

よび運営とは異なる分野の展開と新たなプレイヤーの参加を促す状況がある。これらの分野では、世界を牽引するフラッグシップ的な戦略性の強い中型ミッション、海外大型ミッションへの参加、機動的に実施する小型ミッションなど多様な機会を駆使して日本の先導性と国際間の補完を強く意識した計画の立案と実行を図る。

- 2) 惑星科学分野では、これまでに獲得し世界をリードしている「小天体からのサンプルリターン」をより挑戦的に発展させること、および、今後の本格探査への展開や惑星および木星や土星の氷衛星への生命探査や惑星形成過程の解明を目的としたいいわゆる「重力天体への表面到達」を重点的な課題として取り組む。中型規模の本格的な探査ミッションと高頻度な小型ミッションを機動的に実行できる状況を創出し、前者においては世界をリードする分野の伸張を目指し、後者においては先鋭化したサイエンス目的と、工学的挑戦による課題克服・技術獲得の両者の目的が融合するようなミッションを立案し実行することを目指す。
- 3) 太陽観測、大気科学、磁気圏プラズマなどの太陽圏システム科学分野においては、“その場”観測や地球軌道上からの望遠鏡観測など、日本独自あるいは国際協力による長年の継続的な衛星観測により独自の成果を生み出してきた。今後ともダイナミックに変動する太陽圏システムの仕組みと影響を理解し太陽圏システムの過去から将来にわたる変遷を知ることを課題として取り組む。そのためには、従来の観測スキームや飛翔手段にとらわれることなく、多点・同時、マルチスケール、多数回、長時間などという特徴のある観測を、新たなかつ多様な飛翔機会や観測機会の革新の動きと連携した活動を効果的に推進することを目指す。
- 4) 宇宙工学の衛星探査機工学の分野においては衛星探査機の高度化・高機能化・小型化・軽量化をもたらすためのシステム技術および要素技術などの研究課題に取り組む。小型化高機能化の分野では、例えば2020年代中期以降には、重量半減で「はやぶさ」「あかつき」などと同等機能、などと言う形で、現状の制約にとらわれることなく新たな目標を置き、高機能探査機をより小型軽量化を図る活動をプロモートし、イプシロンロケット高度化と連動して、低コスト・高頻度な宇宙科学ミッションおよび惑星到達ミッションを機動的に実現する事を目指す。
- 5) 太陽系の探査、深宇宙航行システムの高度化と革新、および輸送系の将来に向けた革新を目指す宇宙工学分野においては、推進機関、軽量・耐熱構造材料、超遠距離における自律的システムの構築と通信・エネルギー伝送や航法誘導制御、惑星表面におけるモビリティなど、および飛躍的な低コスト化をもたらすと期待される宇宙システムや輸送システムの再使用化と航空機運航などの学術研究を推進し、これらの成果を用いた、挑戦的かつ宇宙開発全体を先導するようなプロジェクトの創出と実行を目指す。
- 6) 上記各分野においては今後の5ないし10年では既に実行すべきミッションが確定しているあるいはミッション候補の具体的な提案がなされつつある。一方2025年以降の10年間およびそれ以降については、各分野における世界の学術研究の世界の進捗の状況を踏まえた大きな方向性の提示と、それに基づく研究計画あるいは、技術的な実現性をもたらすための研究計画などを戦略的に進めるための考え方や方向性を提示することが適当であろう。ここで考える時間のスコープ設定はこのように今後の10年、20年およびその後の展開にむけた活動に指針を与えるものとすべきである。
- 7) タイムリーかつ持続的な成果の創出、人材育成、コミュニティの連続性と求心力確保などの観点から、下記の規模と頻度の実現を目指す。
 - a) 10年間に3機程度の戦略的フラッグシップミッションを実現する。
 - b) イプシロンクラス規模の小型ミッションを2年に1度程度の頻度で実行する。

c) 国内の多様な飛翔機会および海外のミッション機会を活用した小規模ミッションを高頻度かつ継続的に推進する。

- 8) 月や火星の探査ミッションにおいては、宇宙科学の論理でそのリソースを使って行われるいわゆる科学探査ミッションの他に、政策的、外交、あるいはポスト I S S における有人月火星探査の文脈、などの論理で行われる有人無人の探査ミッションがあり得る。宇宙科学における戦略立案やミッション選定およびそれらの実行が宇宙科学の自立性に基づいて行われることは当然であるが、同時に、これらの宇宙科学の論理以外の活動との間でよい補完関係が構築されることも指向し、これらを高いレベルで両立させ、結果として相互のメリットとすべきである。
- 9) ミッションの創出に際しては、従来の理工学委員会をプラットフォームとしたボトムアップの方法とその実行規模および頻度を規定してその時々で分野や課題に制限を設けない公募の形式でミッション提案を募集する方法では、必ずしも適切かつタイムリーなミッション創出が困難となってきたとの指摘がある。より戦略性を持ち、同時に競争的環境を機能させる事の両立を図って、競争力の高い、よいミッションを創出するような仕組みへの転換を図ることが求められる所以である。戦略策定の議論と同時にこのミッション募集・選定のプロセスの改善も同時に行われなければならない。
- 10) 高いレベルの研究開発を持続的に行うためには、インハウスの研究・試作試験や開発能力を高め、機動的で実験的な飛翔機会やその運用を自律的かつ持続的に実行できる集団であること、またそのための実行インフラの維持、人材の連続性などが死活的に重要であり、ここで述べる戦略の立案およびその実行に際して、インハウスの研究活動および多様な飛翔機会の創出と利用を中心とする日本の宇宙科学の実行環境の維持発展という観点で強く配慮されるべきである。

第3章 各分野の実行戦略

本章では、各分野の実行戦略のサマリーを列記する。この戦略は、研究領域の目標・戦略・工程表を ISAS の宇宙科学・探査プログラム検討チームが分析した上で、プロジェクトの実行責任者としての ISAS の立場から、ISAS としての立場でまとめたものである。その内容は以下の共通の基本的な考え方にそって構成されている。

1. その分野の大目標を最初に設定し、概ね 2020 年代まで（つまり今後約 15 年間）の期間において、その実現に本質的な役割を果たすプロジェクトあるいはミッションを戦略的・優先的にすすめるべきものと設定する。それらの戦略的な技術開発による実現をめざす。プロジェクトの数は、新宇宙基本計画の宇宙科学・探査分野の工程表に示されるプロジェクトスロットに対して、宇宙科学全体で、1.5 倍から 2 倍程度を目標とする。
2. 上記以外のプロジェクトを競争的環境で進めるための環境を維持整備する。それらは、公募型小型計画のスロットの程度半分以上を占めることを想定する。
3. 2030 年代以降に優先して戦略的にすすめるべきプロジェクトの確立をめざした戦略的な技術開発方針を設定する。

宇宙工学分野においては、カバーする範囲が広く、さらにプロジェクトの実行だけではなく宇宙科学はもちろん宇宙開発全体にイノベーションをもたらすような開発研究こそ重要である。このため、宇宙理学分野とは異なる考え方が必要になるため、上記とは異なるまとめ方がされている。宇宙環境利用科学分野についても同様である。

各研究領域の大目標から具体的なプロジェクトへの考え方の流れを付録 A に、また、このまとめに至る分析結果を付録 B から G に示す。

3.1 宇宙物理学分野

3.1.1 戦略的・優先的に進めるミッション

宇宙物理学分野は、

- 宇宙の物質と空間の起源
- 宇宙における生命の可能性

今後 20 年を見据えた大目標とする。これらは、宇宙物理の基本的な問題を、宇宙の時間発展の理解、すなわち、宇宙の開闢から物質と空間の進化を経て惑星系と生命を育む宇宙に如何に進化・発展したのかを理解する、という観点にほかならない。上記の第 1 の大目標を達成するために、3 つの中目標を設定し、その第 3 項目をさらに 4 つの小目標に分割する。

- (1) インフレーション仮説の実証と宇宙の構造の根源
- (2) 宇宙の基本構造を作る物質・エネルギーの本質
- (3) 揺らぎの種からバリオン物質の織りなす現在の多様な宇宙に至る構造形成

- (a) 暗黒時代から最初の天体と再電離へ
- (b) 銀河と巨大ブラックホールの形成
- (c) 活発な星形成と銀河の成長，巨大ブラックホールとの共進化
- (d) 銀河団と大規模構造形成

また，第2の大目標を達成するために，以下の2つの中目標を設定する。

- (4) 惑星系形成
- (5) 直接撮像によるバイオマーカー探査

中目標を達成するために最も本質的な役割を果たし，かつ，今後，研究開発を戦略的にすすめることにより日本の貢献が期待できるミッションを戦略的・優先的にすすめる。

- (1) 「インフレーション仮説の実証と宇宙の構造の根源」の理解のために，マイクロ波宇宙背景放射(CMB)のB-mode 偏光観測を行う LiteBIRD を2020年代までの優先ミッションとし，戦略的にすすめる。
- (2) 「宇宙の基本構造を作る物質・エネルギーの本質」については，優先するミッションを選定せず，他の課題を追求するミッションの中で，あるいは，それらと組み合わせの中で多角的に実施してゆく。
- (3) 「揺らぎの種からバリオン物質の織りなす現在の多様な宇宙に至る構造形成」
 - (a) 「暗黒時代から最初の天体と再電離へ」：少なくとも2020年代までは競争的に実施する。
 - (b) 「銀河と巨大ブラックホールの形成」：初期天体のサーベイを目的としてWFIRSTへの参加を，形成期の大質量ブラックホールの観測を目的としてAthenaへの参加を2020年代までの優先ミッションに位置づける。
 - (c) 活発な星形成と銀河の成長，巨大ブラックホールとの共進化：ダストに包まれた星形成領域と中心ブラックホールの観測を目的として，SPICAを2020年代までの優先プロジェクトに位置づける。
 - (d) 銀河団と大規模構造形成：最初の銀河団あるいは銀河群の形成を探索し，ミッシングバリオンの一部を明確に検出することが期待されるAthenaへの参加を再優先に位置づける
- (4) 「惑星系形成」：地上の可視光望遠鏡やJWSTなどと相補的に惑星形成途中のdebris diskの水の探査等を行うSPICAを重要ミッションと位置づける。
- (5) 「直接撮像によるバイオマーカー探査」：WFIRSTのコロナグラフへの参加を高い優先度に位置づける。

図B.1に戦略的・優先的に進めるミッションのタイムランが示されている。

3.1.2 競争的にすすめるミッション

宇宙の多様性理解から新たな発見が生まれることが多い宇宙物理学の分野においては，前節の戦略的・優先的に進めるミッションに含まれない「多様な宇宙を探索し理解する」ミッションも重要である。また，戦略的・優先的に進めるミッションは，全て国際協力と国際競争の中で実施される。そのような環境で日本がリーダーシップを発揮するためには，独自の技術を持つことが必須である。戦略的・優先的に進めるミッション以外のミッションについて，競争的な環境の中で技術開発をすすめ，さらに実行可能な段階に達したものを選定し実施することも，戦略的・優先的に進めるミッションと同様に重要である。これらは，主として，公募型小型の枠を使って実施をめざす。

3.1.3 戦略的な技術開発

宇宙物理学分野の主要なミッションは大型化し国際協力が必須となる中で、我が国の主体性を維持するために、自ら技術を持つことが欠かせない。また、大型の国際協力ミッションについては、2030年代であっても今から準備する必要がある。そこで、2030年代以降の実現をめざすミッションの技術開発を今から戦略的にすすめる。

- 「インフレーション仮説の実証と宇宙の構造の根源」の理解のために、CMB B-mode 偏光とは異なる周波数帯の重力波直接検出をめざす ESA の LISA への国際協力参加（あるいは国際協力で実現する DECIGO を）をめざした国際協調と技術開発をすすめる。技術開発については、どの部分を優先するかをまず見極め、決定する必要がある。
- 「銀河と巨大ブラックホールの形成」のために JWST, WFIRST を超える感度と空間分解能を実現する近赤外・中間赤外領域の宇宙用大型低温望遠鏡
- 「銀河団と大規模構造形成」のために Athena の X-IFU を超える広い視野を同等の空間分解能、エネルギー分解能で観測する X 線分光検出器。
- 「直接撮像によるバイオマーカー探査」のために WFIRST を超えるコントラストを実現するコロナグラフ

3.2 惑星科学分野

3.2.1 戦略的・優先的に進めるミッション

惑星科学分野の大きな目標は、太陽系生命環境の持続条件の理解 (Continuous HAbitable Solar-system Environment = CHASE) であるが、それは 100 年スケールの時間を要する壮大なテーマであるので、そこに至るための今後 20 年の大目標として、「太陽系生命環境の誕生と持続に至る条件としての前生命環境の進化の理解」(PreBiotic Environmental Evolutions, CHASE-PBEE) を大目標に設定する。これを実現するための中目標は、その対象天体とともに、以下の 5 項目に整理される。

- 太陽系生命環境の誕生と持続に至る条件としての前生命環境の進化の理解
 - C1 生命前駆物質の形成・進化：彗星，始原的小惑星，惑星間塵
 - C2 惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動，天体への供給：月，小惑星，水星
 - C3 地下熱水環境：鉱物－水－有機物反応系：火星，氷衛星，始原的小惑星
 - C4 大気（海洋）散逸・光化学反応：火星，金星，タイタン，系外惑星（大気）
 - C5 惑星・衛星の形成・初期分化：月，水星，火星，分化小惑星（ベスタ，E 型小惑星など）

中目標実現のため、以下のミッションを優先し戦略的にすすめる。

- 1 火星衛星からのサンプルリターン探査 (C1, C2, C4, C5)
- 2 政策的支援型ミッション・工学実証ミッションなどの相乗り機会を利用した月の年代学等の科学 (C2)

これらに加えて、以下のプロジェクトの実現をめざすことを優先し、その技術開発を戦略的にすすめる。

- 3 火星地下水圏・生命圏の着陸探査 (C3)

3.2.2 戦略的な技術開発と進め方

優先するミッションを実現するためには高性能の搭載観測装置が必要である。また、優れた搭載観測装置を自前で持つことにより、国内の技術実証のための太陽系探査ミッション、海外の太陽系科学探査ミッションへの搭載機会を得る可能性も高くなる。そのために、戦略的な搭載機器の研究開発を実施する。惑星科学分野の目標・戦略・工程表から以下の機器をその対象としてあげる。また、競争的環境での開発も並行してすすめるべきである。

(a) 元素測定装置

- レーザー励起ブレイクダウン分光分析装置
- 能動型蛍光 X 線分析装置

(b) 質量分析装置

(c) 地中レーダー

一方、太陽系探査をツールとした生命探査のために戦略的に進めるべき技術分野として、以下をあげる。

- 氷衛星プルーム物質の非破壊サンプルリターン技術
- その場での、高分子の高分解能質量分析技術
- その場での、生命探査技術

これらはアストロバイオロジーとして進展しつつある新分野でもあるが、本来の“Astrobiology”は、「生命はどこで、どのように誕生したのか？」の理解を大目標とする、地上研究、宇宙から/宇宙における研究を含む広い学際的な研究分野である。その中でも、Astrochemistry との関係が深い。「現存する地球外生命を検出する」といったミッションはリスクが高く、これだけを目的とするプロジェクトを提案するのは困難であることから、ミッション装置の確実な技術開発すすめ、地上実験や ISS 等による実証実験を行い、国内外の様々な搭載機会をめざす、といった戦略的な技術開発をすすめるべきであろう。

3.3 太陽・太陽圏科学分野

3.3.1 戦略的・優先的に進めるミッション

太陽圏科学分野の大きな目標は、以下のようにまとめられる。

- 地球上の生命のエネルギーの源である太陽、その太陽の影響を受ける多様性に満ちた地球・惑星系の大気圏・電磁気圏の理解のために、
 - (1) 太陽の活動性を理解し
 - (2) 太陽がどのように太陽圏の環境を作り出しているかを解明する。さらに、
 - (3) 太陽圏を宇宙プラズマの実験室ととらえ、粒子加速や磁気再結合、無衝突衝撃波などのプラズマ物理現象の素過程を明らかにする

また (2) (3) について、以下の「共通の問題意識」が存在する。

- (i) スケール間結合：電磁気圏の非線形性、非定常性、および異なるスケールの現象が動的に結合

- (ii) 領域間結合：電離圏と磁気圏のような異なる領域をプラズマが磁力線を介して結合
- (iii) エネルギー階層間結合：異なるエネルギー階層がプラズマの波を介して動的に結合

この分野は、太陽系科学・惑星科学分野と隣接、あるいは、目的を一部共有しておりそこを通して、これらはアストロバイオロジーとも結びついている。具体的には

- (1) 太陽の活動性の理解：太陽系史を通じた惑星環境変動の理解
- (2) 太陽がどのように太陽圏の環境を創り出すか：惑星表層環境・生命圏の進化の理解、系外惑星の理解

等の目標である。これらの共通性をもつ目的を優先し、太陽系科学・惑星科学のプロジェクトを、太陽・太陽圏科学の立場から牽引する。現在立ちあげ中の JUICE はそのよい例であり、火星衛星サンプルリターン探査や火星着陸探査、といったプロジェクト候補への観測装置搭載も考慮に値する。

「太陽活動理解」(1) を目的とするプロジェクト候補である Solar-C は重要な国際協力の相手であるヨーロッパの提案が不調に終わったため、考え方の変更を迫られている状況にある。また、Geotail 運用中、MMS (NASA 計画) に一部参加・運用中、ひさき運用中、MAVEN IDS (NASA) に参加・運輸中、あかつきの金星軌道投入成功、ERG を開発中、BepiColombo/MMO 打ち上げ準備中、JUICE (ESA) への参加を立ちあげ中という、大量にデータをもたらせる状態にあって、今後これらの成果を踏まえつつ、大目標を達成するサイエンスの流れ整理するためには一定の期間が必要であるように思われる。

3.3.2 競争的にすすめるミッション

太陽系科学・惑星科学のプロジェクトを継続的に牽引するためには、太陽・太陽圏科学の技術開発とプロジェクトを実施していくことが重要である。そのために A) 磁気圏・宇宙プラズマ、B) 大気圏・電離圏、C) 惑星大気圏・電磁気圏のその場観測や撮像観測を目的とするプロジェクトを競争的な環境の中で準備し実施する。

3.4 宇宙工学分野

多面的かつ先進的な科学観測や太陽系探査活動（より遠くへ）に向けた宇宙への自在なアクセス（より自在に）と宇宙でのモビリティを確保し、より高度な宇宙活動を展開するため、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す。

3.4.1 宇宙工学の状況分析ならびに戦略構築の考え方

- 月惑星探査については、重力天体探査の戦略的かつ着実なシナリオが不可欠であり、小型（S-class）および中型（M-class）の双方にて、戦略的な技術実証が求められている。戦略的中型ミッションに比べて計画の機動性や自由度の高い小型科学ミッションによる技術実証を如何に実施するかがポイントとなる。
- 一方、「宇宙科学プログラムロードマップの考え方」にて謳われた「小型・高頻度な月惑星探査」を早期かつ機動的に実現するためには、イプシロンクラスの輸送系で有意な惑星ミッションを行うための、輸送、探査機双方の努力が必要である。

- 探査とアクセシビリティの観点では、未到着の木星・土星域や、これら惑星、遠方小天体へのアクセス確立が目標となる。
- 小型高頻度な探査と、MMX クラスの大型探査に必要な技術が、お互いに連動しながら、低コスト・高機能な探査や科学へと発展していくための、正のスパイラルが必要であろう。
- 小型高機能な要素技術は、大学での発展が著しい超小型衛星・小型衛星と連携の可能性も含め、活性化する超小型衛星の取り組みを、科学への適用のみならず、民間中心のビジネスとして成立する出口戦略が求められている。
- 今後の20年を視野に入れ将来に向けた革新のための研究投資は、新たな輸送や探査機のアーキテクチャの実現をもたらすであろう、新たな宇宙航行や推進、エネルギー供給、再使用型のシステム構築などの持続的な研究成果を宇宙科学の飛翔実験機会を活用することでユニークな研究活動を戦略的に展開すべきである。

3.4.2 宇宙工学の戦略

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・高度化ならびに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。

- 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、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。
- 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、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る。さらには、自律化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。

以下には、宇宙航行輸送分野、ならびに、衛星探査気分野の長期目標と、直近20年の計画をまとめた。

3.4.3 宇宙航行・宇宙輸送分野の目標と、今後20年の計画

3.4.3.1 目標

- 打上げ頻度の最大化のため、ミッションの小型化・高度化（自律化・知能化）と連動し、低コスト・機動的なミッション創出と、太陽系探査科学のミッション実行可能性を拡大する。
- 深宇宙航行に関する化学、非化学推進およびソーラーセイルなどの革新的推進の洗練、深宇宙航行技術と小天体および重力天体の表面到達および表面探査に関わる技術の獲得と成熟による高度なミッションの実行が可能な状況を作る。
- 地球観測をはじめとする科学以外の打上げ需要の拡大と連携し、日本の小型ロケット打上げ機会の低コスト化・高頻度化のために、将来輸送システム構築への貢献、宇宙科学のミッション創出およびロケット技術の立場から貢献する。

3.4.3.2 今後20年の計画

- 2020年代以降の日本の基幹ロケットによる月惑星探査機打ち上げ能力の確保と低コスト化をもたらすため、宇宙科学における研究の立場から、小型飛翔体のプラットフォームを活用して、固体推進技術、極低温液体推進技術、システム構築技術、軽量・耐熱構造材料技術などの技術革新を図る。
- 「はやぶさ2」「MMX」ならびにこれらに続く小天体探査プログラムを策定する。はやぶさシリーズの次の展開をもたらすための戦略的な開発を行い、月／火星探査技術実証、小惑星ならびに外惑星探査（DESTINY、ソーラー電力セイル）までを視野に入れた技術開発を行い、サイエンスと連携してミッションを実行する。
- 深宇宙航行を革新するためのシステム技術・推進技術・再突入・大気圏内飛行から表面到達・着陸までの技術開発を推進し、重力天体への表面到達技術の獲得を図る。2020年代の基幹ロケットと連携し最適化された国際競争力に優れた探査を実現する。
- 将来型輸送システム研究、再使用観測ロケット：再使用システム技術、新たな推進システムの研究などにより、将来型の輸送システムに求められる低コスト高頻度輸送を実現するための研究開発および飛行実証を宇宙科学の小型飛翔機会を活用して行う。

3.4.4 衛星・探査機分野の目標と、今後20年の計画

3.4.4.1 目標

- 衛星探査機技術の高度化により、その成果を反映したミッションを立案し、小型かつ高頻度な太陽系探査ミッションを持続的に実施する。
- 国際協力による補完関係構築も視野に入れつつ、特に「重力天体（月・火星・金星）の表面探査」と「小天体（小惑星など）の往復探査」を実現するための工学研究の推進とミッションの実行を目指す（月／火星探査、木星ならびにトロヤ群探査等）。

3.4.4.2 今後20年の計画

- イプシロンクラスの小型ミッションで、はやぶさ、あかつきクラスの探査ミッションを行えるような、探査機システム技術、バス機器技術の小型軽量化を行い、これらの成果に基づき2020年代中期に機動的かつ工学的挑戦とシャープなサイエンス目的に絞ったユニークな小型惑星ミッションを持続的に実行する。
- 月／火星探査技術実証：月惑星表面探査技術として、自律運用（ロボティクス）、着陸、表面移動、越夜等の技術開発を推進する。
- 将来天文衛星（SPICA、LiteBIRD、DECIGO等）：遠方銀河やブラックホール、ビックバン等の解明を目指した高指向精度・大型構造物の開発と、高感度観測のための極低温冷却系の開発、等を推進する。
- 衛星バス革新研究、小惑星ならびに外惑星探査（ソーラー電力セイル、DESTINY、PROCYON follow-on、等）、新宇宙局：衛星探査機アーキテクチャの革新、超小型化・軽量化、深宇宙航行の通信・航法・誘導・制御技術、非化学推進、ソーラセイル、宇宙空間におけるエネルギー発生・伝送技術などの革新を図り、より高度かつ自在なミッションの実現を図る。
- 1つのアイディアとしては、新規輸送系の研究開発と超小型衛星の運用とをパッケージ化する活動を、ISASも出資する大学連携拠点が中心となって実施するといった方法が考えられる。

3.5 宇宙環境利用科学分野

3.5.1 戦略構築の考え方

宇宙環境利用科学は、「宇宙環境利用」を、ISS など地球近傍において実現される手段を利用して進められてきた。今後は、これまでの延長線上にある ISS ほかに多様な宇宙飛翔体を利用したプロジェクトを進めつつ、宇宙惑星居住科学を究極的な目標において、微小重力科学と宇宙生命科学を重点的にすすめる。20-30 年先の目標として、月表面における低重力環境を用いた科学研究、月環境に固有な科学研究、月資源利用技術の開発実証、太陽系惑星環境での生物生存性研究、閉鎖型生命維持技術研究をおく。

3.5.2 宇宙環境利用科学の戦略

将来の人類の宇宙活動の拡大につながる基礎を宇宙科学の立場で構築するために、当面の目標として月を設定し、以下の理工学研究を推進する。

- 月面の重力場（0.16G）は、0G と 1G を補間する重力場を利用して ISS で行われた微小重力科学研究の成果を実証・発展させる。また、弱い月磁場、太陽風及び地球磁場テールのプラズマ環境、イオン化放射線環境、無大気・水及び他の揮発成分無し、地球生物圏からの隔離、大規模真空・極低温環境など極低温、無磁場、太陽放射線など月環境固有の特性を組み合わせることによって地球環境では困難な科学研究（物理科学、生命科学、応用科学）を推進する。
- 重力惑星環境での生物生存性、閉鎖型生命維持技術など、宇宙空間にてヒトが持続的に生存し、探査活動を可能とするための科学研究、技術開発、実証を実施する。
- 月には大気がなく、重力も小さいことから、地球からの輸送と比べて大幅なコスト低減が可能となるなど、月の資源開発・利用による惑星探査の経済性を追求する。
- 我が国の小型月着陸実証機計画およびその後継機を見据えた、次世代月探査計画と整合する月環境利用ミッションを提案する。

3.5.3 微小重力科学の今後 20 年の計画

軌道上微小重力実験の成果を発展させて、微小重力、高真空、低温など宇宙特有の環境条件をツールとして、人類の活動を惑星空間にまで拡大すると共に、地球社会に貢献する科学技術を構築するために、結晶成長・材料科学・流体科学・燃焼科学・化学工学・基礎物理学・コロイド科学・ソフトマター科学等の、重力依存性の強い現象に関連した分野の研究開発および知識体系の構築を推進する。

3.5.4 宇宙生命科学の今後 20 年の計画

ISS に基盤をおいた「宇宙環境利用」から、ポスト ISS を見通して月・火星への人類の進出、すなわち、究極的には「宇宙における人類の居住」を可能にすることを目的に、重力や宇宙放射線の生物影響などを理解し、それらの課題解決に向けた研究を発展させると共に、宇宙に再生・循環型持続的生命維持システムを構築するために、植物・動物・微生物・重力影響・宇宙放射線・太陽粒子線影響・圏外生物・制御生態系・宇宙医学・宇宙農学等の生命科学分野の研究開発を推進する。

第4章 宇宙科学ミッション工程表

本章では、各分野の実行戦略から抽出された優先候補ミッションをリストし、これら候補ミッションをベースとした宇宙科学ミッション工程表を提案する。

宇宙科学ミッションについて、以下の6種類に分類した：

(1) 戦略的中型ミッション候補として、戦略的に進めるもの：

- マイクロ波宇宙背景放射 (CMB) の B-mode 偏光観測を行う LiteBIRD
- 惑星形成途中の debris disk の水の探査等を行う SPICA
- 火星衛星からのサンプルリターン探査
- 重力天体（月・火星・金星）の表面探査
- 月の年代学等の科学探査，月環境利用
- 小天体探査
- 木星ならびにトロヤ群探査（ソーラー電力セイル）

(2) 小型ミッション候補として、戦略的に進めるもの：

- 月／火星探査技術実証
- イプシロンクラスの小型惑星ミッション

(3) 公募型小型ミッション候補として、競争的に進めるもの：

- 競争的に進めるものとし，ここでは記述しない

(4) 海外ミッションへの参加候補として、戦略的に進めるもの：

- WFIRST
- Athena

(5) 宇宙輸送プログラムとして、戦略的に進めるもの：

- イプシロンロケット
- 再使用観測ロケット

(6) 多様な小規模プロジェクト：

以上のミッション候補群を，4.1 に工程表としてまとめた。

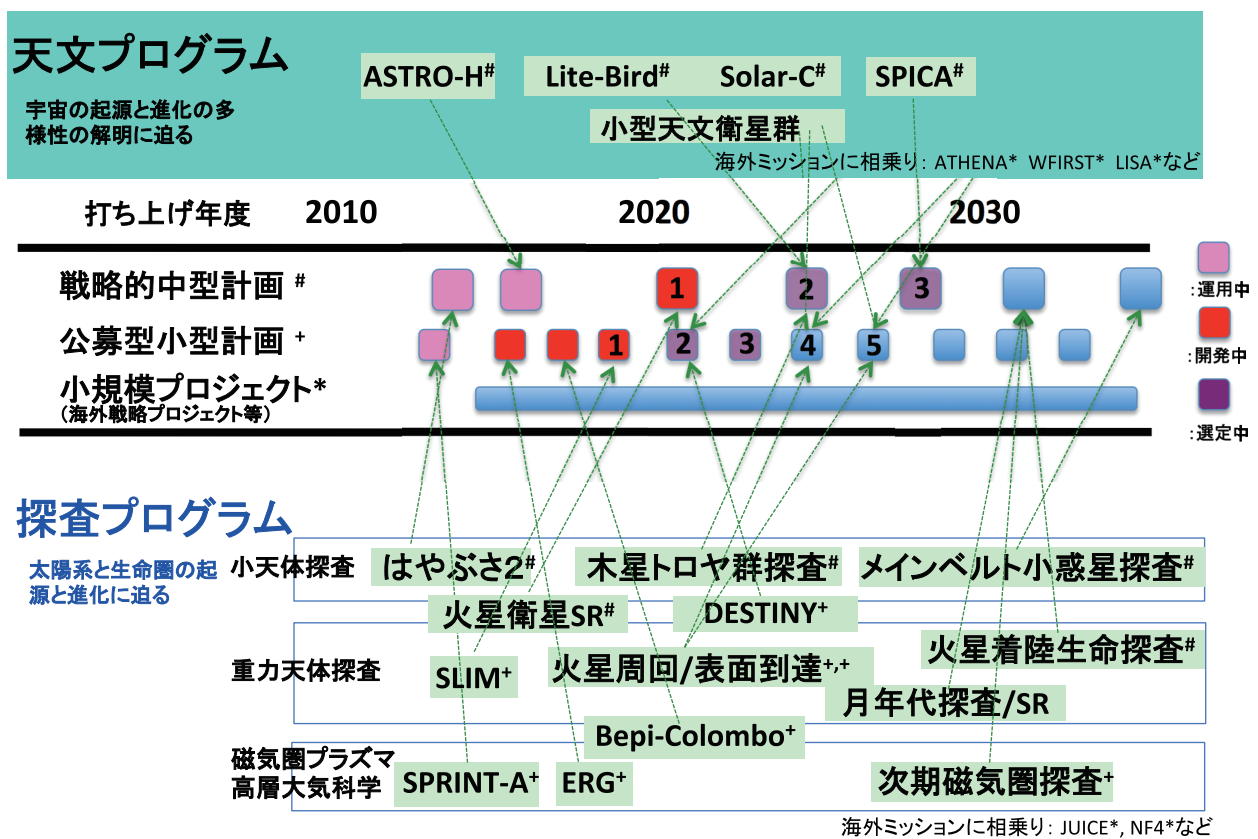


図 4.1: 宇宙科学ミッション工程表 (案)

第5章 まとめ

RFI 回答および戦略立案のための考察から、宇宙物理・天文分野、太陽系探査科学および宇宙工学の各分野における今後 20 年の戦略および戦略の元となる考えを提示した。

ここで議論するような今後の 20 年のスパンでは、直近の 5 年間程度の計画はすでに決まっていて実行する状況にある。その後の、10 年までについても成熟の程度は別にして候補が出ている状況である。10 年後から 20 年は、現在のサイエンスの状況や技術の成熟の状況は変わりうることを考え、戦略性を持った方向性の提示と直近の 5 年および 10 年間の成果の創出状況と、宇宙科学を取り巻く世界の状況変化などをふまえ、あるいはこれらを取捨選択し柔軟な対応と挑戦的な課題設定をしておくことが重要であろう。

さらに 20 年より先も入れた世の中の進歩や学術の新展開やこの間の新規技術の成熟やそれらのレディネスの状況を視野に入れた計画立案が求められる、のである。言い換えれば、20 年という時間の考察で、現在の技術レベルと断絶がないような戦略やロードマップは作るべきでない、との論が正当性を持つであろう。特に惑星ミッションや大型のミッションでは、計画から実行までの時間が 20 年に及ぶ状況が出てきている中で、採用する技術レベルと計画進行と同時に進む技術革新を前提とした計画立案も考慮すべき事柄の一つであろう。

一方で現実の世界では資金面的および人的なリソースの制約から、予め考えた全部の実行は困難であろうが、多数の提案が生み出される競争的環境で淘汰のプロセスを機能させることは、依然として競争力の高いよいミッションを生み出すための大きな必要条件を占めることは言うまでもない。

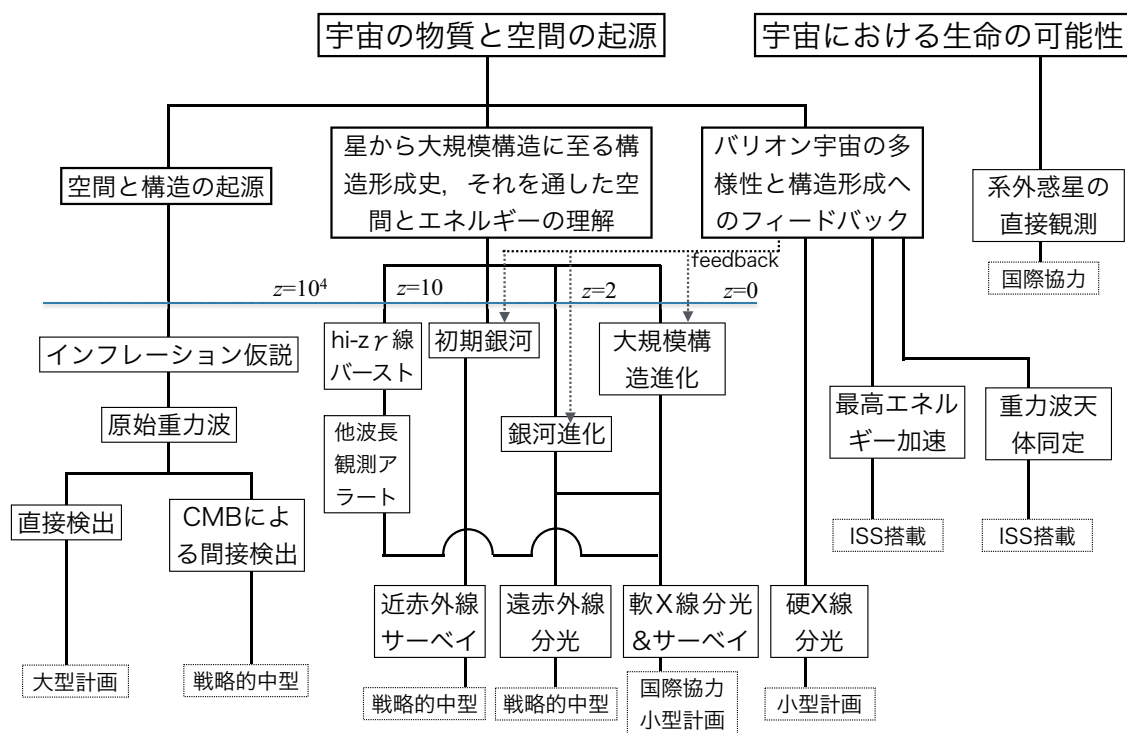
これらの状況の中で、理工の連携、ミッションと輸送系の連携、国際間での補完関係の構築、などの観点で技術革新を生み出す不断の努力とともに、最適なミッション計画を持続的に実行していくことが求められ、ここで示した各分野の大きな意味の戦略に則ってミッション計画の提案や、選定のプロセスを機能させていくこと目指すのであろう。同時に、新たな発見を含む学術の進展や世界との相対的な状況の進展などに対応して柔軟な戦略の見直しを行うこともまた必要なことであろう。従って、本戦略の定期的な見直しを宇宙科学コミュニティにて実施することが重要である。

以上ここで述べた宇宙科学の実行戦略に対する考察が、現在の研究計画を立案するための礎となる事を期待すると同時に、宇宙理学および宇宙工学の両方の意味で挑戦的課題に取り組むインセンティブの元となって、より実りの多い宇宙科学の成果創出に繋がることを期待して結びとする。

付 録 A 各コミュニティからの目標・戦略・工程 表の 1 枚まとめ

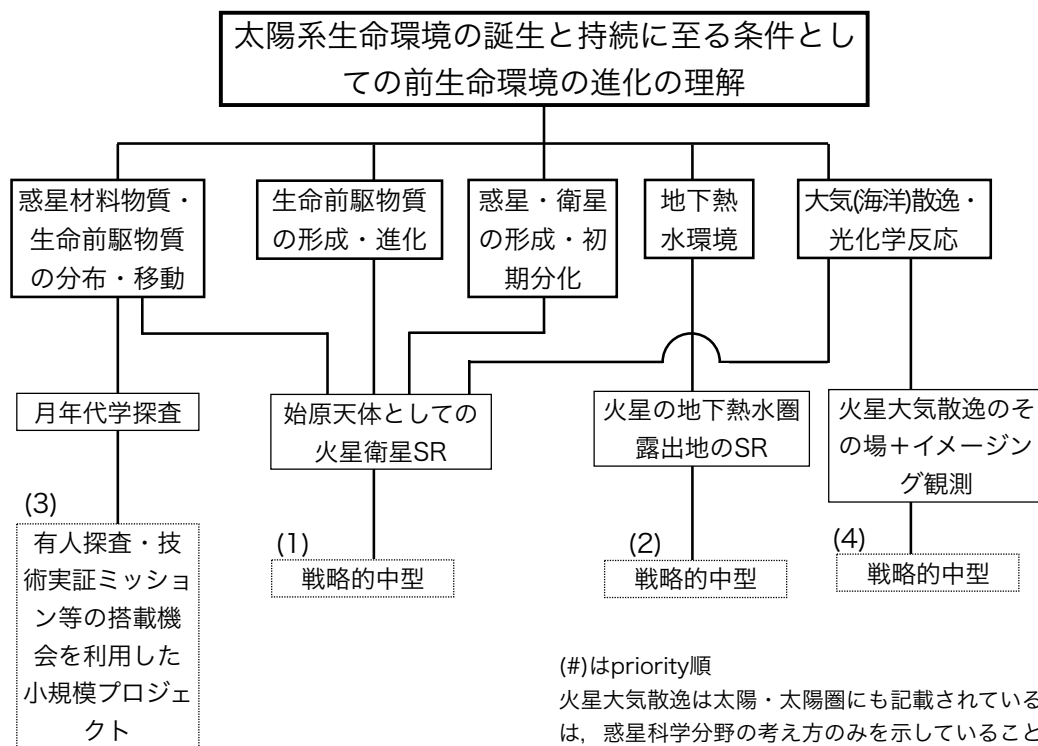
A.1 宇宙物理学分野

天文・宇宙物理学(宇宙線・基礎物理を含む)

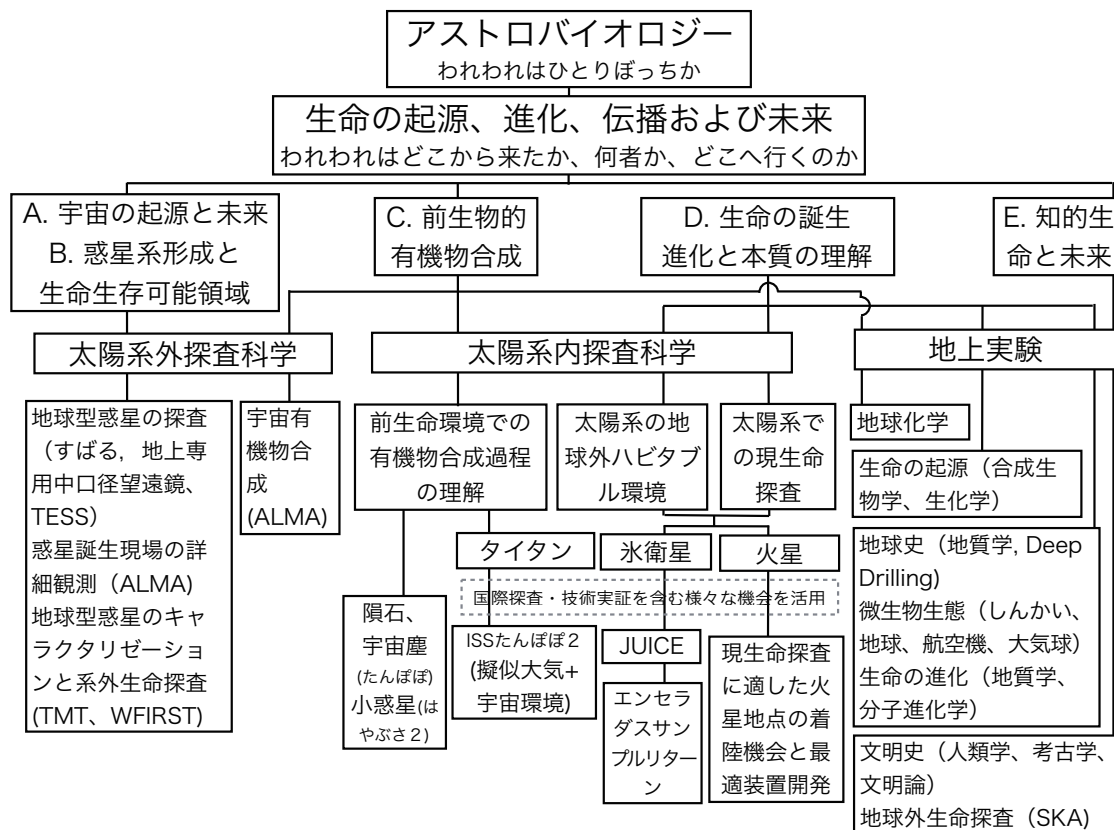


A.2 惑星科学分野

惑星科学分野

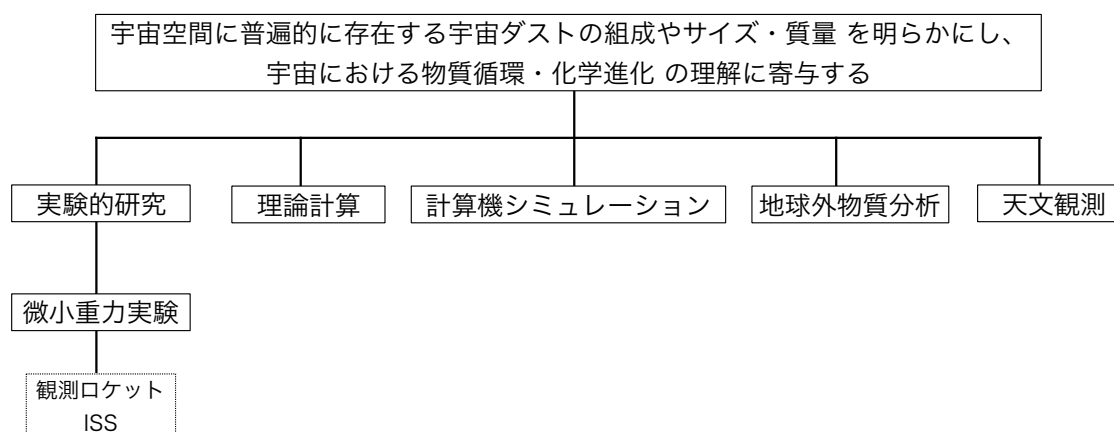


A.3 アストロバイオロジー分野



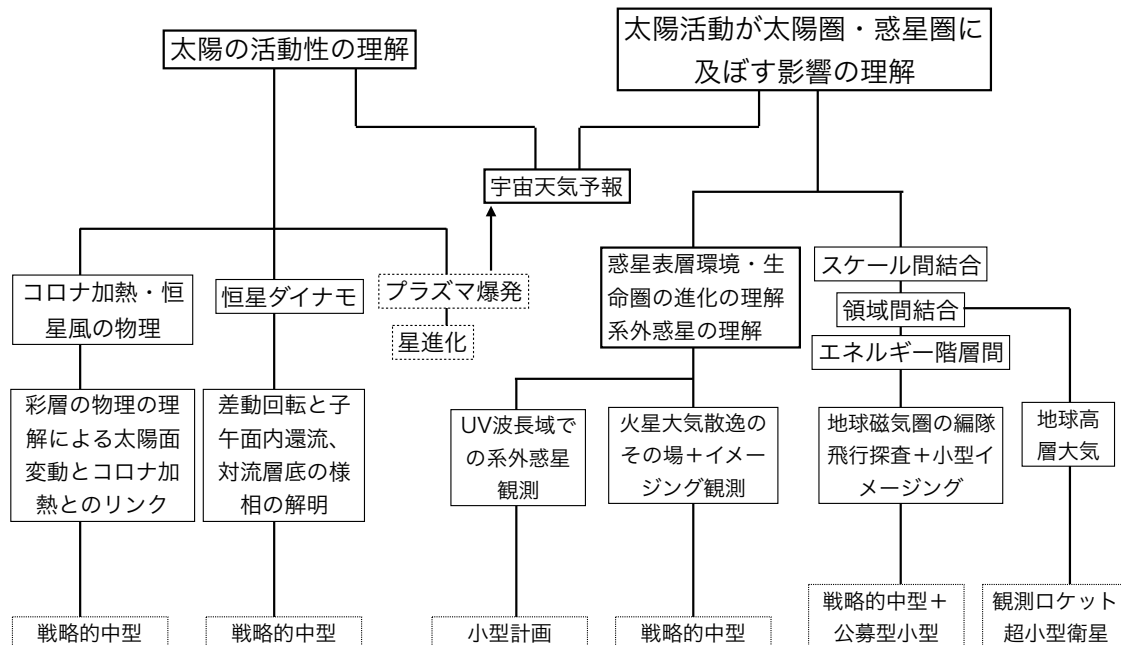
A.4 アストロケミストリー分野

アストロケミストリー



A.5 太陽・太陽圏分野

太陽，太陽圏



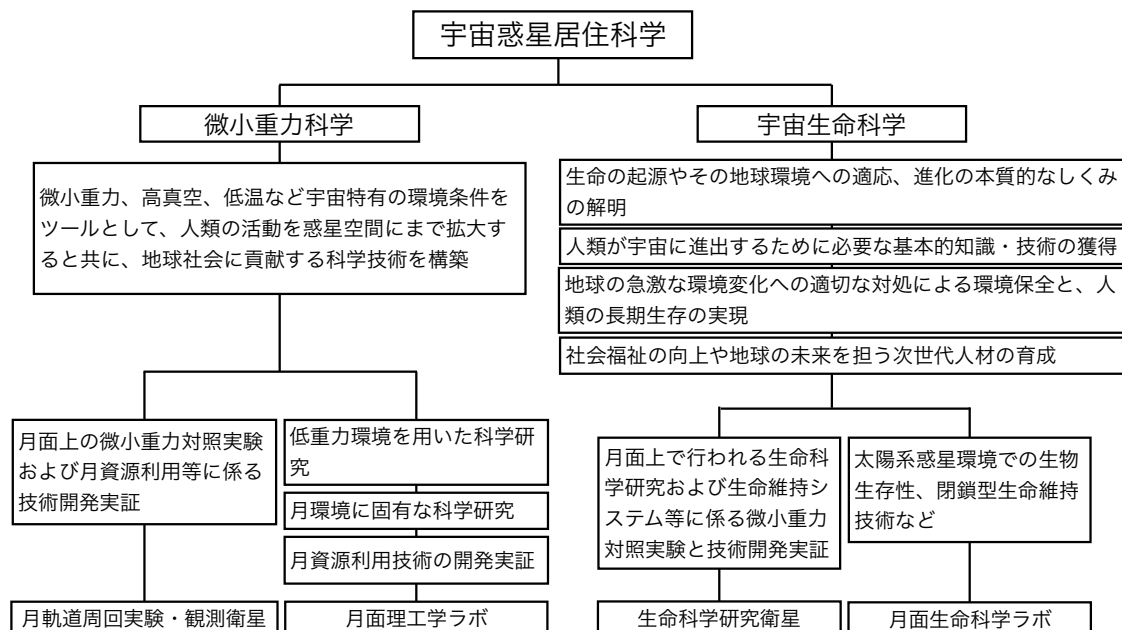
A.6 宇宙工学分野

宇宙工学分野のロードマップ



A.7 宇宙環境利用科学分野

宇宙環境利用科学分野



付 録 B 宇宙物理学

B.1 目標・戦略・工程表

本章は、宇宙物理学分野の目標・戦略・工程表の分析結果をまとめたものである。分析対象とした文書を以下に示す。

宇宙物理学分野の目標・戦略・工程表

- [1] [分野] 光学赤外線天文学分野, [提出団体] 光学赤外線天文連絡会, [代表者] 川端 弘治
- [2] [分野] VLBI によるブラックホール研究, [提出団体] VLBI 懇談会, [代表者] 面高 俊宏
- [3] [分野] インフレーション宇宙仮説の検証を目指す実験・観測研究分野, [提出団体] 宇宙マイクロ波背景放射観測実験コミュニティ, [代表者] 羽澄昌史
- [4] [分野] 宇宙線物理学, [提出団体] CRC(宇宙線研究者会議, Cosmic ray Researchers Congress), [代表者] 神田 展行
- [5] [分野] 高エネルギー宇宙物理学, [提出団体] 高エネルギー宇宙物理連絡会, [代表者] 玉川 徹

B.2 記述されているプロジェクト

表 B.1 に目標・戦略・工程表に記述されているプロジェクトの一覧表をまとめた。この表では、プロジェクト名、主な目的、提案している分野、想定されるプロジェクトの規模／実現方式、競合する、あるいは、相補的なプロジェクト名を示した。目標・戦略・工程表の中に記述されているその分野の国内の地上のプロジェクトも表に加えた。

B.3 戦略的に進めるプロジェクト設定の基本な考え方

宇宙物理学分野の目標・戦略・工程表は、主に波長あるいは電磁波／粒子／重力波観測手段によって分かれたコミュニティ毎に提出されている。このため、宇宙物理学分野全体で大目標から、それぞれの研究にブレークダウンする、という道筋が見えなくなっている。一方、戦略的に進めるプロジェクトの基本的な考え方としては、科学の大目標をその大目標を達成するための中目標に breakdown した時に、その中目標を達成するために最も本質的な役割を果たし、かつ、今後、戦略的に研究開発をすすめることにより日本の大きな貢献を期待できるプロジェクトを選定したい。そこで、以下では、提出していただいた目標・戦略・工程表をもとに、まず、科学の大目標、その大目標を達成するための中目標、さらにそれを breakdown したこのプロジェクトが狙う小目標という流れに再整理する。今後、観測手段によって分かれたコミュニティ同士が集まり、あるいは、連絡をとって、このような方向に目標・戦略・工程表をまとめる努力をお願いしたいと考えている。

2013 年 9 月 19 日第 7 回宇宙科学・探査部会に宇宙航空研究開発機構提出した「宇宙科学・探査ロードマップについて」の II(1/2) で述べられた宇宙科学の 4 つの大目標の中に、宇宙物理学分野の大目標は適切にまとめられている。すなわちその中の以下の 2 つである。

表 B.1: 宇宙物理学分野の目標・戦略・工程表に記述されたプロジェクト（続く）

プロジェクト	目的 (手段)	工程表	手段, 規模	競合/補完関係
SPICA	銀河成長と惑星系形成 (遠赤外線分光)	[1]	L	/ JWST
WISH (超広視野初期宇宙探査)	初期天体形成と宇宙再電離, 宇宙の加速膨張 (近赤外線サーベイ, Type I SN)	[1]	L	WFIRST, Euclid /TMT, LSST
小型 JAS-MINE(赤外線位置天文)	天の川銀河と MBH 形成進化 (赤外線位置天文学)	[1]	M	/ GAIA
WFIRST (光赤外広視野サーベイ)	宇宙の加速膨張 (弱い重力レンズ, BAO, TypeI SN), 系外惑星の性質/形成過程 (コロナグラフによる直接撮像/分光), 初期天体形成 (近赤外線サーベイ)	[1]	MoO	Euclid /TMT, LSST
Euclid (光赤外広視野サーベイ)	宇宙の加速膨張 (弱い重力レンズと BAO)		ESA M2(非参加)	WFIRST /
すばる HSC/PFS	宇宙の加速膨張 (弱い重力レンズと BAO)	[1]	地上	/ Euclid, WFIRST
EXZIT (on ソーラー電力セイル)	宇宙初期天体・再電離過程 (宇宙赤外線背景放射)	[1]	(L 搭載ミッション)	WFIRST. WISH/ WFIRST, WISH
CIBER-2	宇宙再電離期 (赤外線背景放射の揺らぎ, 再電離期の紫外線)	[1]	NASA rocket	WFIRST. WISH/ WFIRST, WISH
SPHEREx	宇宙再電離期 (赤外線背景放射全天観測)	[1]	NASA SMEX	WFIRST. WISH/ WFIRST, WISH
HiZ-GUNDAM	初期宇宙探査による宇宙進化 (高赤方偏移 GRB の特定と通報)	[1, 4, 5]	M	SVOM /
VLBI 気球	直接撮像によるブラックホールの観測的研究 (230 GHz 帯 VLBI)	[2]	気球	ETH, APP /
Event Horizon Telescope (EHT)	直接撮像によるブラックホールの観測的研究 (230 GHz 帯から 350 GHz へ)	[2]	地上	
ALMA phasing-up Project (APP)	直接撮像によるブラックホールの観測的研究	[2]	地上	

表 B.1: (続き) 宇宙物理学分野の目標・戦略・工程表に記述されたプロジェクト

プロジェクト	目的 (手段)	工程表	手段, 規模	競合/補完関係
LiteBIRD	宇宙マイクロ波背景放射偏光観測によるインフレーションの実証	[3]	L	CORE+, PIXIE / CMB-S4
CMB-S4	宇宙マイクロ波背景放射偏光 (重力レンズ, インフレーション)	[3]	地上	
K-EUSO	最高エネルギー宇宙線の到来方向非一様性	[4]	MoO	Auger, TA / Auger, TA
Auger	最高エネルギー宇宙線スペクトル, 到来方向	[4]	地上	
TA	最高エネルギー宇宙線スペクトル, 到来方向	[4]	地上	
Pre-DECIGO, DECIGO	インフレーションの実証とインフラトン (原始重力波背景放射 (DECIGO), その技術実証として中性子星, 中質量 BH 連星合体 (pre-DECIGO))	[4]	L, LL(?)	LISA
LISA-path finder, LISA	大質量 BH 連星合体, インフレーション (原始重力波)	[4]	ESA L3	
KAGRA	中性子連星合体による重力波	[4]	地上	
SMILE	(広視野高感度 MeV ガンマ線天体広域探索観測)	[4]	気球	
GAPS	暗黒物質の間接検出 (反重陽子検出)	[4]	気球	
Athena	宇宙大規模構造形成, 大質量 BH 形成	[5]	MoO	
PRAXyS (GEMS)	X 線偏光分光	[5]	MoO	IXPE(NASA), XIPe (ESA) /
DIOS	宇宙大規模構造形成 (広視野 X 線分光)	[5]	M	/ Athena
NGHXT	MBH 質量関数, 宇宙線加速 (硬 X 線イメージ)	[5]	M (?)	Fermi, CALET / JWST, SPICA, AstroSat SSM /
WF-MAXI	突発天体監視, 特に重力波対応天体	[5]	S (ISS)	

L=戦略的中型, M=公募型小型, MoO=小規模プロジェクトの中の海外ミッションへの参加。S=それ以外の小規模プロジェクト。LL=L を超えた大型計画。

(1) 宇宙の物質と空間の起源

(2) 宇宙における生命の可能性

これらを宇宙物理学分野の大目標に設定する。これら出発点として、提出された宇宙物理学分野の目標・戦略・工程表内容に基づきつつ、中目標、小目標へと breakdown する。すなわち、宇宙物理の基本的な問題として、宇宙の時間発展、すなわち、宇宙の開闢から、物質と空間の進化を経て、惑星系と生命を育む宇宙に如何に進化・発展したのかを理解する、という観点でまとめる。その中で 2020 年代（今後約 15 年）までの時間尺度で、大目標達成に本質的な役割を期待するプロジェクトを、優先し戦略的にすすめるプロジェクト候補と位置づける。

一方、必ずしもこの基本問題には一致しない目的もあるが、それらも宇宙物理学の特性上重要である。「宇宙の多様性の探査と理解」としてまとめる。

B.4 宇宙の物質と空間の起源

B.4.1 宇宙の一様性、平坦性、構造形成の起源

Λ -CDM (Cold Dark Matter) モデルは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) から現在の宇宙の銀河から大規模構造にいたる宇宙の構造進化を、よく再現し、驚くべき成功をおさめている。そこでは、宇宙の物質エネルギーの基本的なパラメータである $\Omega_R, \Omega_\Lambda, \Omega_M, \Omega_b$ 、と現在の膨張速度 H_0 、物質の揺らぎの大きさとスケール依存性の初期値 (σ_8, n_p) を与え、一般相対論を仮定することで、この宇宙を（一部の小さなスケールを除いて）非常によく再現することができる。次の大きな課題は、

(1) なぜ宇宙一様で平坦 ($\Omega_R + \Omega_\Lambda + \Omega_M = 1$ な構造をしているのか？

(2) 如何にして ($n_p = 1$ の) 構造形成の種が与えられたのか？

(3) Ω_M の大半 (約 85%) を担う暗黒物質とは何であるか？

(4) 現在の宇宙を加速膨張させている Ω_Λ の本質は何であるのか？

という問いである。(1)(2) への有力な答えがインフレーション仮説である。

B.4.1.1 インフレーション仮説の実証と宇宙の構造の根源

インフレーションにともって発生した原始重力波の検出はインフレーション仮説実証の最有力な方法であると考えられている。そのために、二つの方法が提唱されている。第一は、重力波が CMB の揺らぎの中に残した痕跡（偏光の揺らぎの B-mode 成分）を検出することである。CMB 偏光揺らぎの B-mode 成分の検出は地上観測により精力的に行われている。しかし、B-mode 成分には原始重力波による偏光の他に、銀河系のダストにより発生する偏光、宇宙の大規模構造に伴う重力レンズ効果により発生する偏光が存在し、これらはごく低空間周波数を除いて、原始重力波による偏光よりも強いと予想される。実際に、高い空間周波数では、重力レンズによりつくられる CMB 偏光揺らぎの B-mode 成分がすでに観測されている。低空間周波数で観測を行うためには宇宙空間に出て、全天を一様に観測することに高い有意性があり、また、ダストなどの前景放射を除去するためにはより高い周波数まで観測可能な宇宙からの観測に有意性がある。地上観測に対する有意性と相補性が高い。もう一つの方法は、重力波背景放射を観測し、その中に、原始重力波を探すことである。重力波背景放射には、宇宙の様々な場所で起きた大質量ブラックホール (MBH) 同士の合体、中性子星・白色矮星連星の合体に伴う重力波が前景放射として含まれていると予想され、原始重力波の観測のためには、前景放射の弱い周波数帯を狙って観測する必要がある。CMB 偏光と重力波観測の現状を考える

と、まずは、CMB 偏光揺らぎの B-mode 成分の検出に集中して、原始重力波の検出を目指すべきである。[3] を提出した宇宙マイクロ波背景放射観測実験コミュニティは、2007 年から米国と協力して地上の観測を実施し、それを宇宙観測に発展させるプロジェクト、LiteBIRD を 2015 年に戦略的中規模 (L-Class ミッション) として提案した。

CMB 偏光揺らぎの B-mode 成分の検出は、超低周波の重力波を検出していることに相当している。インフレーションの存在がもしも実証された場合、次の大きなテーマは、インフレーションの元になったインフラトン場の理解である。そのためには、CMB 偏光揺らぎの B-mode 成分のより正確な強度と空間スペクトルと共に、全く異なる周波数で原始重力波を測定する重力波の直接検出も最重要の観測となるであろう。これは強大であると当時にかつてない観測精度が要求されるプロジェクトである。その実現には、国際協力が必須である。

(a) この分野において 2020 年代までの範囲で優先するプロジェクト : LiteBIRD

(b) 2020 年代を超えて実現に向けて戦略的に国際協力と技術開発を進めるべきプロジェクト : LISA/DECIGO

B.4.1.2 宇宙の基本構造を作る物質・エネルギーの本質

Ω_M の約 85% を担う暗黒物質を直接、あるいは、間接に検出する様々な試みが行われている。その中で、space から宇宙物理学は天体からの間接検出において重要な役割を担う。宇宙物理学分野の目標・戦略・工程表の中で、暗黒物質の間接検出を陽に述べているのは、[4] 中の GAPS プロジェクトのみである。実際には、暗黒物質の種類と質量によっては、RF から γ 線に至る電磁波や、宇宙線観測に暗黒物質間接検出の可能性がある。しかし、暗黒物質の種類と質量の可能性は、磁場で RF 電波に変換する Axion から、GeV から数 100 GeV ガンマ線に崩壊・対消滅する WIMP まで、幅があまりにも広く、これらを主要なターゲットとしたプロジェクトを提案することは困難である。しかし、宇宙観測プロジェクトを検討する際には、常に、この可能性を検討すべきであり、観測計画の立案時にも考慮すべきである。

宇宙の加速膨張の本質の理解のために提案されている観測の大多数は、天体までの実距離と赤方偏移 z の関係から、加速膨張の起源をダークエネルギーであるとした場合の状態方程式 $p = w\rho c^2$ とその時間変化 (w の値と時間変化) に制限をつけようとするものである。しかし、 w の値と時間変化を制限することによって、本質的理解にどれだけ近づくのはよく分からないところがある (see White)。一方、大規模構造形成の観測と組み合わせることで、宇宙の加速膨張がダークエネルギーによるものなのか、一般相対論の修正が要するものであるのかを区別する可能性も示唆されている。宇宙の加速膨張の本質の理解のための観測は、実施すべきであるが、宇宙の構造形成や系外惑星の観測などとともに組み合わせて、実施すべきである。

(a) 暗黒物質の間接検出、宇宙の加速膨張の本質の理解のための観測、ともに宇宙物理学の優先課題であるが、その解決に至る道筋の可能性は多岐であり、特に、加速膨張については本質な理解に向けた道筋が見えない状況である。従って、他の重要課題、特に次の節で述べる課題を追求するミッションの中で、あるいは、それらと組み合わせて多角的に実施してゆく必要がある。

B.4.2 揺らぎの種からバリオン物質の織りなす現在の多様な宇宙に至る構造形成

初期揺らぎの成長から非線形な成長より天体形成に至る重力的な過程は、 Λ -CDM モデルによりよく再現されている。しかし、重力相互作用以外は無視できる暗黒物質と異なり、電磁総合作用を持つバリオン物質は揺らぎの成長過程で様々に振る舞い、暗黒物質だけでは作り得ない複雑な天体の性質を作り出してきた。放射とバリオン物質の強い結合が解かれた宇宙の晴れ上がり時 (CMB 形成時) の構造形成の種 (インフレーションにより作られたごく僅かな密度揺らぎ) から、生命を育むような

複雑な現在の宇宙にどのようにしていったのかの理解は、「宇宙の物質と空間の起源」の中目標の重要な一つである。宇宙の構造形成は、 Λ -CDM モデルから、基本的にはボトムアップ的に、つまり、小さな構造から次第に大きな構造が作られたことは間違いない。以下では、この構造進化の中で、解決すべき重要課題を時間順に整理する。

B.4.2.1 暗黒時代から最初天体と再電離へ

宇宙の晴れ上がりの直後は、天体が何も存在せず、光を出すものがない暗黒の時代がしばらく続いていたと考えられる。物質は中性化していたので、水素の電離エネルギー以上の光は届きにくい状況にあった。その後、6-10 億年の間に、宇宙は再び電離したことが、CMB の偏光や遠方のクエーサー／銀河の観測から分かっている。これは天体（星）が生まれ、その紫外線光による電離であると考えられている。水素とヘリウムしかない物質から生まれた星は、現在の、例えば我々の銀河系の星とは大きく異なっていると理論的には予想されている。この第一世代の星がどのような天体であり、どのような光が宇宙を再電離したのか、を直接観測的に理解することは、最重要テーマの一つである。しかし、 $z > 10$ のような遠方宇宙の観測には様々な困難がある。このため、比較的小さなプロジェクトで実施してゆくことが好ましい。2030 年代以降に戦略的に立ち上げるべきプロジェクトを創出することをめざして、技術開発も競争的な環境で実施する。

- (a) 2020 年代までは、比較的小型の観測装置による赤外線背景放射の揺らぎによる宇宙再電離光の検出（SHEREx, EXZIT, CIBER-2）を競争的な環境の中で実施する。

B.4.2.2 銀河と巨大ブラックホールの形成

第一世代の天体によって、宇宙に水素・ヘリウム以外の重元素が作られはじめ、銀河の中心に存在する巨大ブラックホールの種と銀河も形成されると考えられる。巨大ブラックホールは指数関数的な質量増加を示した時期が存在する。その結果、形成された銀河中心ブラックホールと銀河バルジの質量の間には強い相関があることが知られている。これは、銀河とブラックホールは影響しあいながら、あるいは、同じパラメータに支配されて成長したためであると考えられる。

この理解に至る重要な手法として二つが必要である。まず、第一世代の天体の後、初期銀河はどのように成長したのか？その中で銀河中心のブラックホールは如何に成長したのか、これらを遠方（ $10 > z > 5$ ）の初期銀河のサーベイにより直接捉えることが考えられる。次に、 $z \sim 5$ から現在に至るまでに、銀河とブラックホールの成長過程を追う必要がある。これについては、次節で述べる。

- (a) 初期天体のサーベイ：近赤外線観測 WISH, WFIRST。どちらも、宇宙の加速膨張の理解を目的に含む。光学赤外線天文連絡会は、WISH よりも SPICA を高順位に位置づけている。このことから、WFIRST にこのサイエンス目的での参加を検討することを 2020 年代までは優先すべきである。

- (b) 形成期の大質量ブラックホールの観測：軟 X 線サーベイ観測と分光観測 Athena

B.4.2.3 活発な星形成と銀河の成長、巨大ブラックホールとの共進化

$z \sim 5$ から $z \sim 1$ の時代に、活発な星形成が行われ、銀河は成長したと考えられている。何が星形成を活発化し、そして、止めたのか？この銀河成長と中心ブラックホールの共進化とはどのような関係にあるのか？など、現在のバリオン物質の宇宙を理解に欠かせない疑問がこの時代には多く存在する。活発な星形成の一部はダストに包まれており、星形成領域からの紫外線をダストにより変換した中間赤外線・遠赤外線観測が有効である。また、中心ブラックホールについても一部はダストに包ま

れており、その観測には中間赤外線・遠赤外線は有効である。一方、ダストトールスが一定の厚さ以下であれば、硬 X 線による観測も有効である。また、位置天文観測による我々の銀河系の中心領域のダイナミクスの詳細観測も、銀河と巨大ブラックホールの共進化について相補的な情報を与える。これらの観測の相補性と有効性について慎重に検討する必要がある。

- (a) ダストに包まれた星形成領域と中心ブラックホールの観測：中間赤外線・遠赤外線による銀河サーベ이의観測として、SPICA を 2020 年代までの再優先ミッションに位置づける。

B.4.2.4 銀河団と大規模構造形成

宇宙の構造形成のボトムアップシナリオの中で最後に作られるのが宇宙の大規模構造であり、銀河団はそのフィラメント構造が集まったハブに相当する。大規模構造の形成期は宇宙が物質の重力による減速膨張からの加速膨張に転じた時期に重なるため、この研究は加速膨張の本質的な理解につながる可能性もある。近傍 ($z < 0.1$) の比較的 massive な銀河団がどのように形成・成長したのかについては、ASTRO-H SXS による X 線スペクトル観測、eROSITA/SRG 衛星の X 線観測や、SPT などの SZ 電波観測により今後 5-10 年の間に理解が進むと予想される。その後の主な興味は、(1) $z \sim 2$ の時代におきたと予想される最初の銀河団あるいは銀河群の形成、(2) 銀河団周辺部を含めて、現在の宇宙のバリオン物質を探索し、それが描き出す宇宙の大構造を詳細に調べること、の二つになると予想される。(1) については、Athena 計画が重要な役割を果たす。Athena は (2) に関連して、ミッシングバリオンを明確に検出すると予想されるが、低密度のバリオン物質をマッピングするだけの能力は持たず、新たなミッションが必要である。

- (a) $z \sim 2$ の時代におきたと予想される最初の銀河団あるいは銀河群の形成を探索し、ミッシングバリオンの一部を明確に検出することが期待される Athena を 2020 年代までの再優先のミッションに位置づける。

Athena を超えた、さらに低密度のバリオン物質までマップするミッションの実現に向けた技術開発が期待される。

B.5 宇宙における生命の可能性

B.5.1 惑星系形成

暗黒物質が作る構造進化の中で、バリオン物質が様々な豊かな構造を宇宙に作り出した。その中で、星の周辺には惑星系も形成された。1995 年の最初の系外惑星の発見から今日までに 2000 個を超える系外惑星が見つかった。惑星系形成は太陽系科学からも重要なテーマであるが、宇宙物理学からは、星形成にともなってどのような惑星系が形成されるのか、その中でも、生命を持つ可能性の高い水を持つ岩石惑星はいかにして作られるのか、を多くの系外惑星の観測と理論的な研究から明らかにすることが重要である。

- (a) 地上の可視光望遠鏡や JWST などと相補的に惑星系形成途中の debris disk の水の探索等を行う SPICA を 2020 年代までの重要ミッションと位置づける。

B.5.2 直接撮像によるバイオマーカー探索

これまでのドップラーやトランシット法に対して、コロナグラフによる直接撮像と分光が重要となる。WFIRST は、 10^{-10} 以上のコントラストと 0.1 秒角以上の離角の惑星の検出と、 $R=80$ の分光に

よるメタンや水の検出をめざしている。これが実現すると、いくつかの地球サイズ系外惑星を分光し、水が検出できる可能性がでてくる。

(a) WFIRST のコロナグラフへの参加を 2020 年代までは高い優先度に位置づける。

B.6 宇宙物理学分野の優先度付と工程表

B.6.1 戦略的に進めるべきミッション

第 B.4 節と第 B.5 節より，図 B.1 の太線で示すミッションを「宇宙の物質と空間の起源」と「宇宙における生命の可能性」の理解をめざした宇宙物理学分野の戦略的に進めるべき優先ミッション候補として設定する。これらを戦略的にプロジェクト化するための技術開発と国際機関間の調整を戦略的に JAXA のリードで実施することを提言する。これらは，戦略的中型 (L-class；太い線) と比較的大きな国際ミッション参加小規模ミッション (MoO S-class) である。

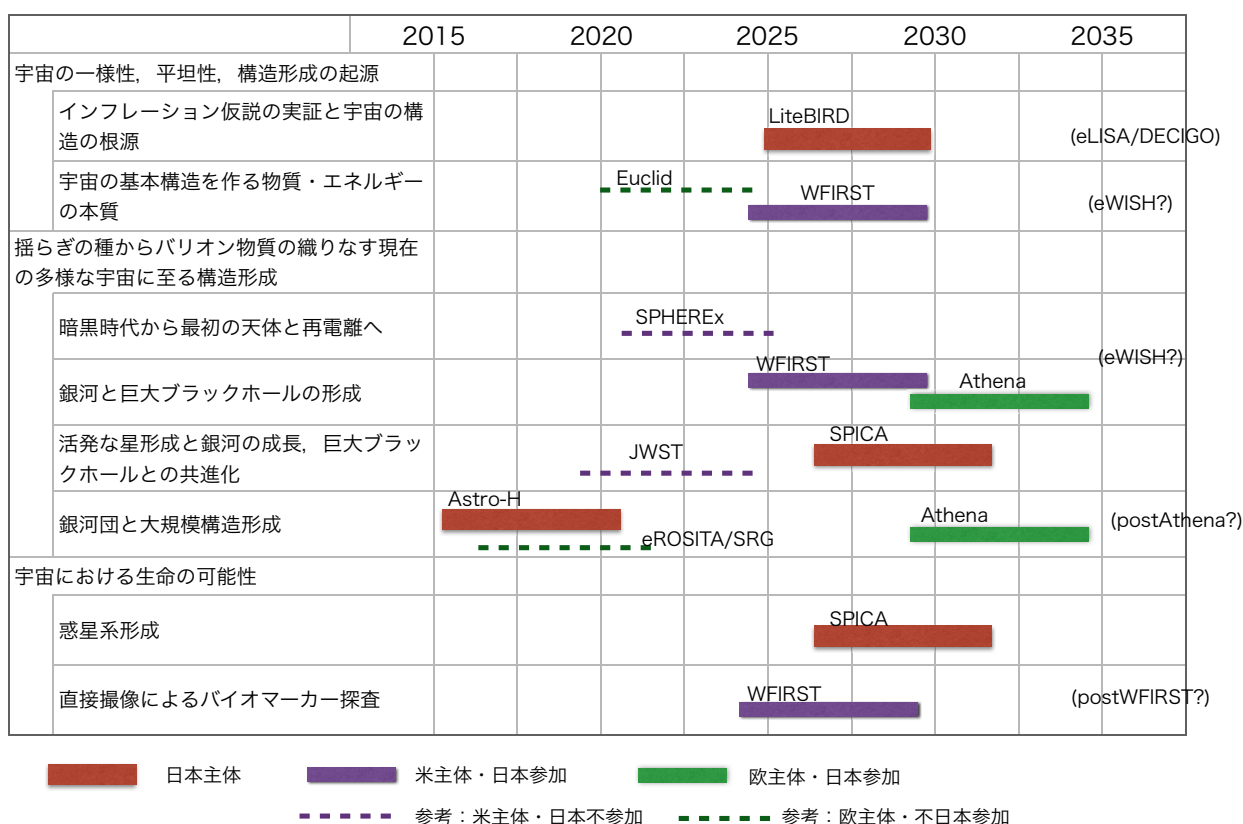


図 B.1: 戦略的に進めることを推奨するミッション (破線以外)。「宇宙の物質と空間の起源」と「宇宙における生命の可能性」の理解のために重要と考えられる海外のみのミッションも破線で参考のために示した。カッコつきのミッションは，これらの研究をさらに進めるために，今から技術開発を開始しておくべきミッション候補である。

これらの戦略的にすすめるべきミッションは，2020 年代までの（一部の運用期間は 2030 年代前半にはいる）ミッションである。今回のコミュニティからの目標・戦略・工程表には必ずしも明確には示されていないが，2030 年代半ばから後半の実現をめざして戦略的にすすめるべきミッションをカッコつきしめた。これらのミッションはいずれも，国際協力で進める必要があるが，日本がイニシアチブを取るためには，技術開発を今から戦略的に開始すること必要がある。戦略的技術開発をすすめるべき技術として以下をあげたい。

- インフレーション仮説の実証と宇宙の構造の根源：ESA の LISA への国際協力参加（あるいは国際協力で実現する DECIGO を）をめざした国際協調と技術開発をすすめる。技術開発については、どの部分を優先するかをまず見極め、決定する必要がある。
- 直接撮像によるバイオマーカー探査：WFIRST を超えるコントラストを実現するコロナグラフと、それと組み合わせる分光装置
- 暗黒時代から最初の天体と再電離へ / 銀河と巨大ブラックホールの形成：JWST, WFIRST を超える感度と空間分解能を実現する近赤外・中間赤外領域の宇宙用大型低温望遠鏡
- 銀河団と大規模構造の形成：Athena の X-IFU を超える広い視野を同等の空間分解能、エネルギー分解能で観測する X 線分光検出器

B.6.2 戦略的に進めるべきミッション以外のミッションの考え方

前節はもちろん、図 B.1 の太線以外のミッションを進めない、ということの意味するわけではない。宇宙物理学では、宇宙の多様性理解から新たな発見が生まれることが多い。したがって「多様な宇宙を探索し理解する」ミッションも、「宇宙の物質と空間の起源」と「宇宙における生命の可能性」を目的に加えて必要である。また、後者においても、戦略的ではなく競争的過程で選ばれるミッションがあってしかるべきである。図 B.2 には、宇宙物理学の目標・戦略・工程表に記載された space ミッションをすべて加えた。これらは、公募型小型 (M-class) や小規模ミッション (S-class) として競争的に選定されるのが適切である。これらを実現するためのキー技術の中で他の競争的資金では獲得しにくい項目については、競争的環境で選定の上で着実にすすめる。

これらの技術開発やミッションは、戦略的ミッションを進めるために必要な技術と人を育てるという意味合いでの重要性もあり、その観点でどのように戦略的にすすめるかが課題である。

B.7 まとめ

「宇宙の物質と空間の起源」、「宇宙における生命の可能性」を宇宙物理学分野の大目標とし、これら出発して、提出された宇宙物理学分野の目標・戦略・工程表内容に基いて中目標・小目標への breakdown を行ない、戦略的かつ優先的にすすめるべき 2020 年代までのプロジェクトを抽出した。

第 1 の大目標からは 3 つの中目標を導いた。第 1 の中目標「インフレーション仮説の実証と宇宙の構造の根源」からは、優先するプロジェクトとして LiteBIRD を抽出した。第 2 の中目標「宇宙の基本構造を作る物質・エネルギーの本質」については、他の課題を追求するミッションの中で、あるいは、それらと組み合わせて多角的に実施してゆく必要があると結論した。第 3 の中目標「揺らぎの種からバリオン物質の織りなす現在の多様な宇宙に至る構造形成」はさらに 4 つの小目標にブレイクダウンされ、その中から、優先するプロジェクトとして SPICA を、実現に向けて戦略的に国際協力を進めるべきプロジェクトとして WFIRST, Athena を選定した。

第 2 の大目標からは 2 つの中目標を導き、それぞれから、SPICA および WFIRST を優先するプロジェクトと戦略的に国際協力を進めるべきプロジェクトとした。

宇宙物理学分野の主要なミッションは大型化し国際協力が必須となる中で、我が国の主体性を維持するために、自ら技術を持つことが欠かせない。ここで掲げる大目標は、2030 年代半ば以降においても再優先の目標であることが予想され、その時期の国際的なプロジェクトを日本がリードするためには、技術の研究開発を今から戦略的にすすめる必要がある。いくつかの具体的なプロジェクトを念頭において、以下の技術要素をあげた。LISA および DECIGO 実現に向けた戦略的に国際協力と技術開発、WFIRST を超えるコントラストを実現するコロナグラフ、JWST, WFIRST を超える感度と空間

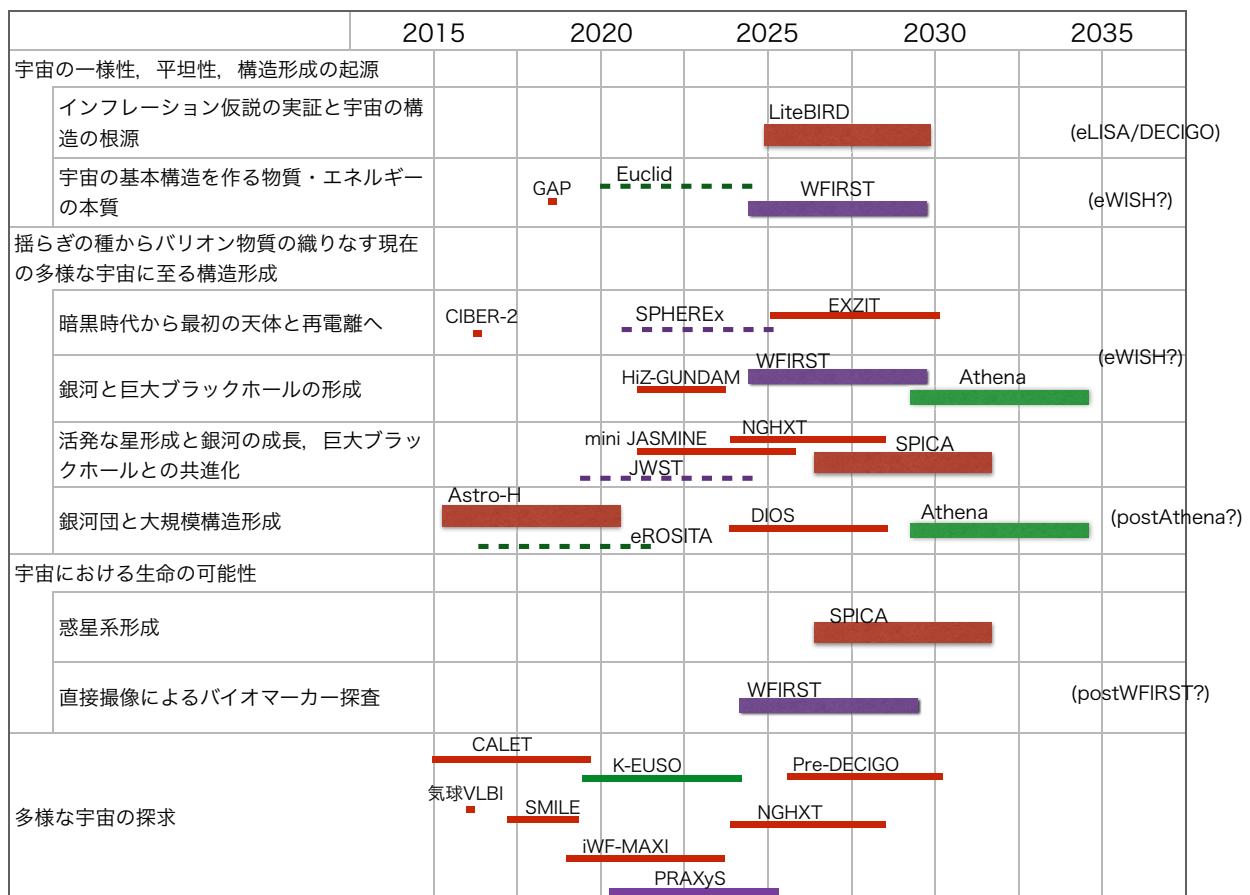


図 B.2: 宇宙物理学の目標・戦略・工程表に記載された全てのミッション。戦略的に進めることを推奨するミッション（太線, 中太線）以外のミッション（細い実線）は競争的に選定されることを想定する。

分解能を実現する近赤外・中間赤外領域の宇宙用大型低温望遠鏡，Athena の X-IFU を超える広い視野を同等の空間分解能，エネルギー分解能で観測する X 線分光検出器。

宇宙の多様性理解から新たな発見が生まれることが多い宇宙物理学の分野においては，上記の戦略的に進めるべきミッションに含まれない「多様な宇宙を探求し理解する」ミッションも重要である。これらは競争的過程で選定し実施すべきである。これは，上記の「自ら技術を持つ」ことにも直結する。

付 録 C 惑星科学

C.1 目標・戦略・工程表

本章は、惑星科学分野の目標・戦略・工程表の分析結果をまとめたものである。分析対象とした文書を以下に示す。

惑星科学分野の目標・戦略・工程表

[6] [分野] 惑星科学/太陽系科学, [提出団体] 惑星科学会, [代表者] 倉本 桂

C.2 記述されているプロジェクト

表 C.1 に目標・戦略・工程表に記述されているプロジェクトの一覧表をまとめた。この表では、プロジェクト名、主な目的、提案している分野、想定されるプロジェクトの規模／実現方式を示した。

C.3 惑星科学の目標

惑星科学分野の大きな目標は、太陽系生命環境の持続条件の理解 (Continuous HAbitable Solar-system Environment = CHASE) にある。これは、100 年スケールの時間を要する壮大なテーマであるので、そこに至るための今後 20 年の大目標として、惑星科学分野目標・戦略・工程表は、「太陽系生命環境の誕生と持続に至る条件としての前生命環境の進化の理解」(PreBiotic Environmental Evolutions, CHASE-PBEE) を大目標に設定している。

前生命環境とは、生命が関与しない有機反応ネットワークをもつ天体環境を指し、生命材料物質や生命環境（生命誕生・維持を可能にする天体環境）の準備過程のことである。最終結果である地球外生命そのものの探索だけでなく、それに至る（あるいは、途中で失敗したためにそれに至ることがなかった）この準備過程を解明してこそ、宇宙における生命の普遍性の理解への突破口となると考えられる。しかし、地球ではその後の地球環境の進化と生命進化によって、生命誕生前の情報が失われてしまっており、太陽系探査によって実証的にデータを積み上げてゆくことのみで達成可能な目標である。太陽系探査のプログラムの実施によって現在や過去に関する実証的なデータを積み上げ、実証に基づいた環境の解釈・復原をすすめることによってのみ達成可能な目標である。そのためには、生命関連物質、大気や流水、堆積場や反応場に関する環境指標の読み出しと年代決定を行い。各天体に特化せず比較惑星学的手法で太陽系における前生命環境進化を俯瞰的に理解していく戦略が必要である。

CHASE-PBEE を太陽系探査によって実現するための中目標は、その対象天体とともに、以下の 5 項目に整理される。それぞれの項目とともに戦略として検討すべき事項を以下にまとめた。

- 太陽系生命環境の誕生と持続に至る条件としての前生命環境の進化の理解

C1 生命前駆物質の形成・進化：彗星、始原的小惑星、惑星間塵

表 C.1: 惑星科学の目標・戦略・工程表に記述されたプロジェクト

プロジェクト	目的 (手段)	工程表	手段, 規模	競合/補完関係
火星衛星サンプルリターン 探査	初期太陽系の物質分布移動からハビタブルな表層環境変動までの前生命環境進化	[6]	戦略的中型	
火星地下水圏・生命圏 着陸探査	火星地下水の化学的特徴把握, 初期火星温暖化, 炭素表層蓄積量と水散逸史	[6]	戦略的中型	MARS2020
火星大気散逸 探査	過去の大気散逸量推定と散逸機構の太陽変動応答特性	[6]	戦略的中型	
月面その場観測 KREEP 物質・年代 測定探査	クレータ年代測定の精密化, 月全球熱源元素量推定。マグマオーシャン最終固化時期特定	[6]	戦略的中型	
月裏側原始近くサンプルリ ターン探査	マグマオーシャンから固化した原始地殻物質をサンプルリターン。初期地殻形成の時期と過程を理解	[6]	戦略的中型 (政策的支援型)	
ペネトレータ 技術実証	月地殻厚さの決定	[6]	公募型小型	
火星探査プログラム工学実 証探査	複数の工学実証を含む	[6]	公募型小型 (複数機)	
木星氷衛星探査 (JUICE- JAPAN)	生命存在可能領域としての氷衛星内部海の形成条件	[6]	小規模プロジェクト (MoO)	

- － 長時間に見合う意義がある未踏の探査（メインベルトや彗星からの SR はミッション期間が 10 年を超える）と短期間で帰還可能な天体の中で最も始原始的な天体のどちらを選ぶか、という二つの選択肢をよく考える必要がある。

C2 惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動、天体への供給：月，小惑星，水星

- － かぐやの成果を活かした月年代学探査を優先すべき

C3 地下熱水環境：鉱物－水－有機物反応系：火星，氷衛星，始原的小惑星

- － 火星探査と氷衛星探査の選択肢がある。
- － 一部の深いクレータの底に露出しているとされる 38 億年前以前の火星の地下熱水圏の物質科学/物理探査/年代学探査には日本の独自性がある。氷衛星探査は国際協力で進めるべき。

C4 大気（海洋）散逸・光化学反応：火星，金星，タイタン，系外惑星（大気）

C5 惑星・衛星の形成・初期分化：月，水星，火星，分化小惑星（ベスタ，E 型小惑星など）

C.4 惑星科学の優先するプロジェクトと戦略

以上の議論を踏まえて、以下のミッションを優先する。

1 火星衛星からのサンプルリターン探査

CHASE-PBEE の文脈のなかで火星と小惑星を組み合わせた戦略が最優先であるが、その中で比較的短い時間で、多くの目的を達成可能な火星衛星の SR を、トロヤ群探査の長時間の未踏の探査との 2 択の中で、選択する。CHASE-PBEE の文脈の中で、火星衛星からのサンプルリターン探査は表 C.2 に示す広い範囲をカバーする

2 政策的支援型ミッション・工学実証ミッションなどの相乗り機会を利用し、焦点を絞った科学的価値の高い小型搭載ミッションにより月科学を実施する。ミッション機器の開発のために小規模プロジェクトの枠を戦略的に活用する。

これらに加えて、以下のプロジェクトの実現をめざすことを優先し、その技術開発を戦略的にすすめる。

3 火星地下水圏・生命圏の着陸探査

一部の深いクレータの底に露出しているとされる 38 億年前以前の火星の地下熱水圏の物質科学探査/物理探査/年代学探査であり、着陸可能候補地の 1 つは McLaughlin クレータである。現時点では、現存生命探査は高リスクであり搭載ミッションとしてはオプション扱いとする。

C.5 搭載機器の戦略的開発

前節の優先するミッションを実現するためには高性能の搭載観測装置が必要である。また、優れた搭載観測装置を自前で持つことにより、国内の技術実証のための太陽系探査ミッション、海外の太陽系科学探査ミッションへの搭載機会を得る可能性も高くなる。そのために、戦略的な搭載機器の研究開発を実施する。惑星科学分野の目標・戦略・工程表は以下の機器の開発を優先すべき糖鎖機器としてあげている。戦略的な研究開発の対象以外の機器については競争的環境で開発をすすめる。

(a) 元素測定装置

- レーザー励起ブレイクダウン分光分析装置

表 C.2: 惑星科学の目標・戦略・工程表における火星衛星サンプルリターンの位置付け

		対象天体	実績・計画	火星のメリット	探査の方法
C1	生命前駆物質の形成・進化	彗星・始原的小惑星・惑星間塵	小惑星探査機「はやぶさ」・「はやぶさ2」	火星衛星は始原的なD型/C型小惑星が捕獲された可能性が高い。	火星衛星のSR: 火星衛星は捕獲後熱変成を受けにくく、内部に氷を保持する可能性がある
C2	惑星材料物質・生命前駆物質の分布・移動, 天体への供給	月・小惑星・水星	小惑星探査機「はやぶさ」・「はやぶさ2」, 「かぐや」データに基づくクレータ年代学, 「ベピ・コロombo」水星への物質供給	小惑星帯に近く, 惑星/生命材料物質の太陽系内の移動と供給の記録を保持している可能性	火星衛星のSR: 火星周回中に衛星表面に蓄積された火星物質の年代測定
C3	地下熱水環境: 鉱物-水-有機物反応系	火星, 氷衛星, 始原的小惑星	「かぐや」による月表層リモートセンシングデータ	地下熱水環境	火星クレータへの着陸とSR
C4	大気(海洋)散逸・光化学反応	火星, 金星, タイタン, 系外惑星(大気)	「JUICE/GALA」(到着は2030年!)	表層太陽光環境	火星衛星のSR: 火星大気散逸原子の衛星表面物質への打込みの痕跡
C5	惑星・衛星の形成・初期分化	月, 水星, 火星, 分化小惑星(ベスタ, E型小惑星など)	「あかつき」金星大気(2015年軌道投入)	惑星・衛星の形成・初期分化: 火星とその衛星は, 地球・月系との比較対象	火星衛星のSR: 火星衛星形成過程の物証を得る

- 能動型蛍光 X 線分析装置

(b) 質量分生装置

(c) 地中レーダー

付 録 D アストロバイオロジー・ケミストリー

D.1 目標・戦略・工程表

本章は、アストロバイオロジーと関連する分野としてアストロケミストリー分野の目標・戦略・工程表の分析結果をまとめたものである。分析対象とした文書を以下に示す。

アストロバイオロジー・アストロケミストリー分野の目標・戦略・工程表 2016 (2016 年 3 月 28 日)

- [7] [分野] アストロバイオロジー (宇宙と生命), [提出団体] 日本アストロバイオロジーネットワーク, [代表者] 山岸 明彦
- [8] [分野] アストロケミストリー, [提出団体] 宇宙環境利用リサーチチーム 「宇宙ダストと核生成」・低温科学研究所 共同研究推進部プログラム 低温ナノ物質科学 (予定), [代表者] 木村 勇気
- [9] [分野] 宇宙生命科学 [その中の圏外生物], [提出団体] 一般社団法人 日本宇宙生命科学会, [代表者] 高橋 幸秀

D.2 他の分野の目標・戦略・工程表とアストロバイオロジー目標・戦略・工程表

“Astrobiology” は、宇宙と生命に関わる研究分野として NASA が作り出した造語である。今回目標・戦略・工程表が提出された多くの研究分野の目的の中には、アストロバイオロジー、あるいは、それに関連するキーワードが含まれている。図 D.1 は、研究分野とともにそれらのキーワードを示した。このようにアストロバイオロジーは様々な分野に関連する学際的な研究分野である。アストロバイオロジーはこのように、学際的な視点で捉える必要がある。

このため、A.3 節のダイアグラムに示すように、アストロバイオロジー目標・戦略・工程表の中目標は、実施手段として、天文学・宇宙物理学分野の手段、太陽系探査科学分野の手段、さらに地上実験によって達成されるもので成り立っている。

D.3 アストロバイオロジーの目標・戦略・工程表

表 D.1 に目標・戦略・工程表に記述されているプロジェクトの一覧表をまとめた。この表では、プロジェクト名、主な目的、提案している分野、想定されるプロジェクトの規模／実現方式、競合する、あるいは、相補的なプロジェクト名を示した。

D.4 サイエンス目標

目標・戦略・工程表に記述されている科学目的（大目標、中目標、小目標）、そこから導かれる手段は以下のようにまとめることができる。

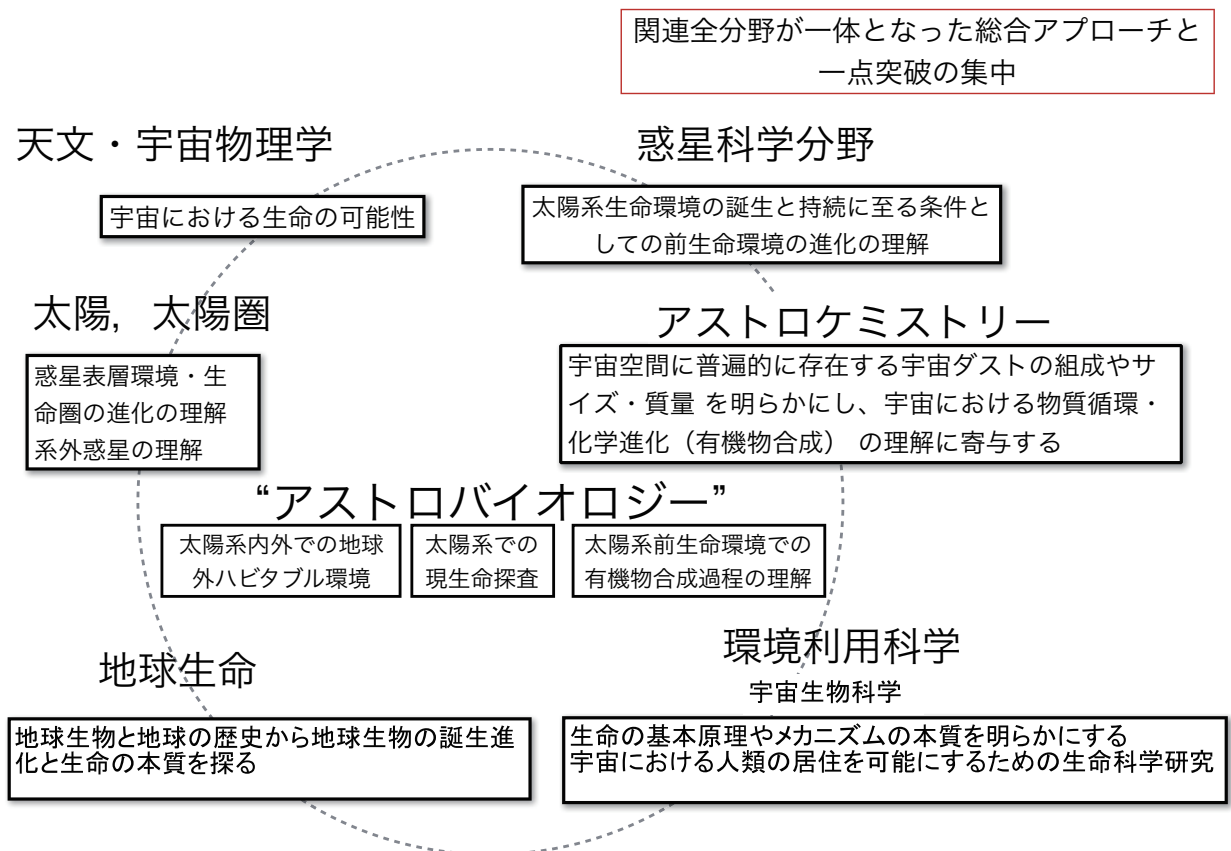


図 D.1: 様々な分野の目標・戦略・工程表に記述されたアストロバイオロジーにつながる研究目的 (実線の四角)。アストロバイオロジーからの目標・戦略・工程表には, “アストロバイオロジー” の下の 3 つと宇宙物理学に書かれている宇宙における生命の可能性として, 系外惑星の研究が記述されている。

表 D.1: アストロバイオロジー・アストロケミストリー分野の目標・戦略・工程表に記述されたプロジェクト

プロジェクト	目的 (手段)	工程表	手段, 規模	競合/補完関係
たんぽぽ	有機物含有宇宙塵等微粒子採集	[7, 9]	小規模 ISS	
たんぽぽ 2 (化学進化実験ミッション)	タイタンにおける化学進化反応の解明	[7, 9]	小規模 ISS	地上実験
火星着陸生命 探査	火星着陸による火星生命探査	[7, 9]	L or LL(?) の一部として搭載	MARS2020
JUICE ミッション (一部)	氷衛星: 木星衛星の地下海の存在の検証	[7]	MoO	
氷衛星噴出粒子サンプルリターン	エンセラダス噴出氷微粒子その場分析とサンプルリターン	[7]	MoO NASA ミッションへの参加	
炭素質ナノ粒子の宇宙風化と星間有機物進化	合成した炭素質ダスト候補物質の宇宙環境暴露による赤外吸収スペクトル変化	[8]	ISS ExHAM	
宇宙ダストの核形成と凝集	微小重力下での宇宙ダストの核形成と凝集	[8]	NASA ロケット	
低温ナノ物質形成	低温固体の微小重力下での生成	[8]	?	
宇宙風化	宇宙環境での分解	[2]	ISS ExHAM	

- 大目標：生命の起源，進化，伝搬および未来
 - A 宇宙の起源及び未来と生命誕生及び未来の連関を明らかにする
 - － 宇宙物理学における宇宙論研究と重なる研究領域。
 - B 惑星系形成過程と生命生存可能領域の可能性を明らかにする
 - － 多数の系外惑星の観測的・理論的研究。理論研究と宇宙物理学領域と重なるリモート観測。
 - － 太陽系におけるハビタブル領域の探査。
 - C 前生物的有機物合成過程を明らかにする
 - － 電波などによる宇宙物理学研究によるアミノ酸等の観測的研究。
 - － 小天体サンプルリターン。
 - － タイタン大気，エンセラダスプルーム等のその場観測とサンプルリターン。
 - － 宇宙塵など惑星間空間浮遊物のサンプルリターン。
 - － 地上の化学実験
 - D 生命の誕生過程を明らかにし、生命進化、伝播と本質を解明する
 - － 地球生命の研究。
 - － 太陽系の地球外ハビタブル環境の探査と太陽系内生命探査。（火星・氷衛星）
 - E 知的生命誕生の過程を明らかにすることから未来を予測する
 - － 知的生命探査。
 - － 自然科学に限定されない研究。

D.5 戦略的なすめ方

“Astrobiology” は、地上研究，宇宙から/宇宙における研究を含む広い学際的な研究分野である。宇宙探査科学という観点では、太陽系での (1) ハビタブル環境を探す事、(2) 生命誕生以前の有機物の合成過程を探る事、(3) 現存する生命を宇宙に探す事が、最重要課題であり、その対象としては、生命が誕生した、あるいは現存する可能性のある A. 火星、B. 氷衛星、を大きな探査対象である。

その一方で、たとえば惑星科学分野の目標・戦略・工程表に述べられているように、「現存する地球外生命を検出する」といったミッションはリスクが高く、これだけを目的とするプロジェクトを提案するのは困難であろう。

ミッション装置の確実な技術開発すめ、地上実験や ISS 等による実証実験を行い、国内外の様々な搭載機会をめざす、といった戦略的な技術開発をすすめるべきであろう。戦略的に進めるべき技術分野としては以下をあげる。

- その場での、生命探査技術，特に、生命探査顕微鏡
- 氷衛星プルーム物質の非破壊サンプルリターン技術
- その場での、アミノ酸分析を含む高分子の高分解能質量分析技術

D.6 まとめ

“Astrobiology” は、「生命はどこで、どのように誕生したのか？」の理解を大目標とする、地上研究，宇宙から/宇宙における研究を含む広い学際的な研究分野である。その中でも、Astrochemistry

との関係が深い。中目標である「太陽系前生命環境での有機物合成過程の理解」と「太陽系における現生命の探査」はハイリスク・ハイリターンのミッションとなることから、それだけ为目标とする単独ミッションはたてにくい。そこで、火星、氷衛星探査を念頭に、ミッション装置の確実な技術開発すすめ、地上実験やISS等による実証実験を行い、国内外の様々な搭載機会をめざす、といった戦略的な技術開発が必要である。その具体的な例としては、氷衛星プルーム物質の非破壊サンプルリターン技術、その場での、高分子の高分解能質量分析技術、その場での、生命探査技術があげられる。

付 録 E 太陽圏科学

E.1 目標・戦略・工程表

本章は、太陽圏科学分野として、太陽、地球・惑星および惑星間空間プラズマ分野の目標・戦略・工程表の分析結果をまとめたものである。分析対象とした文書を以下に示す。

太陽圏科学分野の目標・戦略・工程表

- [10] [分野] 太陽地球惑星系科学, [提出団体] 地球惑星電磁気圏探査検討グループ, [代表者] 藤井 良一
- [11] [分野] 海洋を含む地圏・大気圏・電離圏, [提出団体] ELMOS ワーキンググループ, [代表者] 小山 孝一郎
- [12] [分野] 太陽・太陽圏研究領域, [提出団体] 太陽研究者連絡会, [代表者] 草野完也

E.2 記述されているプロジェクト

表 E.1 に目標・戦略・工程表に記述されているプロジェクトの一覧表をまとめた。この表では、プロジェクト名、主な目的、提案している分野、想定されるプロジェクトの規模／実現方式を示した。

E.3 太陽圏科学分野の目標

太陽圏科学分野の大きな目標は、以下のようにまとめられる。

- 地球上の生命のエネルギーの源である太陽、その太陽の影響を受ける多様性に満ちた地球・惑星系の大気圏・電磁気圏の理解のために、
 - (1) 太陽の活動性を理解し
 - (2) 太陽がどのように太陽圏の環境を作り出しているかを解明する。さらに、
 - (3) 太陽圏を宇宙プラズマの実験室ととらえ、粒子加速や磁気再結合、無衝突衝撃波などのプラズマ物理現象の素過程を明らかにする

[10] には、(2) (3) について、以下の「共通の問題意識」があるとしている。

- (i) スケール間結合：電磁気圏の非線形性、非定常性、および異なるスケールの現象が動的に結合
- (ii) 領域間結合：電離圏と磁気圏のような異なる領域をプラズマが磁力線を介して結合
- (iii) エネルギー階層間結合：異なるエネルギー階層がプラズマの波を介して動的に結合

表 E.1: 太陽圏科学分野の目標・戦略・工程表に記述されたプロジェクト

プロジェクト	目的 (手段)	工程表	手段, 規模	競合/補完関係
JUICE	巨大ガス惑星系の起源と進化, 木星磁気圏	[10]		
火星大気散逸	火星の二酸化炭素と水の行方	[10]	戦略的中型	
Neo-SCOPE	衝撃波, 次期再結合などの宇宙プラズマの素過程	[10]	戦略的中型	
オーロラ編隊飛行観測	磁気圏-電離圏のスケール間結合	[10]	公募型小型	
系外惑星専用紫外線望遠鏡	系外惑星の大気と大気散逸	[10]	公募型小型	
Fujin	惑星の連続観測	[10]	小規模プロジェクト B	
MTI-WAVE	超高層大気波動	[10]	小規模プロジェクト B	
超小型オーロラ観測衛星	磁場・電場・プラズマ波動・粒子・オーロラ光	[10]	小規模プロジェクト B	
IMAP	太陽圏・星間風の相互作用	[10]	小規模プロジェクト B	
NITRO	上層大気, 内部磁気圏 (ESA M4)	[10]	小規模プロジェクト MoO	
GEO-X	磁気圏界面の高解像度・時間分解能撮像観測	[10]	公募型小型	
SMILES2	中層大気	[10]	公募型小型	
ELMOS 小型衛星群	地震前電離圏変動の立証	[11]	公募型小型 (複数?)	
Solar-C	a) 彩層・コロナと太陽風形成機構 b) 太陽面爆発現象発現機構と発生予測 c) 地球気候変動に影響する太陽放射スペクトル変動	[12]	戦略的中型	
Solar-D	太陽周期活動を駆動するダイナモ機構	[12]	戦略的中型	

記述されているプロジェクトの中で, すでにプロジェクト化されている ERG と Bepi-Colombo/MMO はリストから除いた。

一方, [10] の中で, (2) と (3) は A) 磁気圏・宇宙プラズマ, B) 大気圏・電離圏, C) 惑星大気圏・電磁気圏の場所の違いによる 3 領域に分かれて記述されている。なお [11] は B) の一部について述べたものである。3 領域「それぞれのビジョンを書いた」とされているが, 実際には, 領域間およびプロジェクト間の優先度, 有機的なつながりの関係の記述がなく, これまでの成果と検討中の将来ミッションを場所に分けた上で, それぞれの目的を記述した, と言わざるをえない。このため, 今後どのような戦略で, 「太陽がどのように太陽圏の環境を作り出しているか」を解明し, 上記の問題意識への回答を得ようとしようとしているのかを明確に読み取ることができない。この野は, Geotail 運用中, MMS (NASA 計画) に一部参加・運用中, ひさき運輸中, MAVEN IDS (NASA) に参加・運輸中, あかつきの金星軌道投入成功, ERG を開発中, BepiColombo/MMO 打ち上げ準備中, JUICE (ESA) への参加を立ちあげ中という, 大量にデータもたらされようとしている状態にある。今後これらの成果を踏まえつつ, 大目標を達成するサイエンスの流れ整理するためには一定の期間が必要であるように思われる。

一方 (1) については,

- (a) コロナ加熱・恒星風の物理の理解, すなわち, 光球からコロナへのエネルギー注入を理解すること
- (b) 恒星ダイナモの理解と, それによって太陽の磁場の長期的な変動を理解し, 太陽系史を通じた太陽系天体への太陽の影響を把握すること

を中目標としている。(a) については, これまでの研究で残された領域である「彩層の物理」理解を重点的な項目としている。[12] では, (a)(b) を目的とするミッションを, それぞれ, 一つずつ定義し, (a)(b) の順に実施するとしている。(a) の具体的なプロジェクト候補である Solar-C は重要な国際協力の相手であるヨーロッパの提案が不調に終わったため, 考え方の変更を迫られている状況にある。

E.4 優先付けと戦略

太陽・太陽圏分野は, 太陽系科学・惑星科学分野と隣接, あるいは, 目的を一部共有している。具体的には

- (1) 太陽の活動性の理解: 太陽系史を通じた惑星環境変動の理解
- (2) 太陽がどのように太陽圏の環境を創り出すか: 惑星表層環境・生命圏の進化の理解, 系外惑星の理解

等の目標である。さらに, これらはアストロバイオロジーとも結びついている。これらの共通性をもつ目的を優先し, 太陽系科学・惑星科学のプロジェクトを, 太陽・太陽圏科学の立場から牽引するようなプロジェクトを優先する。現在立ちあげ中の JUICE はそのよい例である。また, 火星衛星サンプルリターン探査や火星着陸探査, といったプロジェクト候補も考慮に値する。さらに, JUICE に続く優先プロジェクトを考える必要があるであろう。

太陽系科学・惑星科学のプロジェクトを継続的に牽引するためには, 太陽・太陽圏科学の技術開発とプロジェクトを実施してゆくことが重要である。そのために 図 E.1 に記載されたプロジェクトを競争的な環境の中で実施, あるいは実施をめざすことが必要である。

E.5 まとめ

付 録F 宇宙工学

本稿では、工学系目標・戦略・工程表の分析に基づき、提案されたミッションの概要を示すと共に、宇宙工学の戦略の第1案をまとめた。

F.1 目標・戦略・工程表

宇宙工学コミュニティからの全提案リストは、以下のとおり。

宇宙工学分野の目標・戦略・工程表

- [13] [研究領域] 宇宙科学を推進する輸送系の研究，[団体名] 再使用および固体推進関連 WG，[代表者名 (所属)] 森田泰弘 (JAXA)
- [14] [研究領域] 再使用観測ロケット，[団体名] 再使用観測ロケットチーム，[代表者名 (所属)] 小川博之 (JAXA)
- [15] [研究領域] 宇宙推進燃料工学（固体，液体），[団体名] 高エネルギー物質研究会，[代表者名 (所属)] 羽生宏人 (JAXA)
- [16] [研究領域] 高機能ハイブリッドロケットの研究，[団体名] ハイブリッドロケット研究 WG，[代表者名 (所属)] 嶋田徹 (JAXA)
- [17] [研究領域] 展開型柔軟構造物による宇宙飛翔体，[団体名] 柔軟構造物を利用した先進的大気圏飛翔体の研究開発 WG，[代表者名 (所属)] 鈴木宏二郎 (JAXA)
- [18] [研究領域] 高機能熱制御システム，[団体名] 高機能熱制御システム研究 G，[代表者名 (所属)] 小川博之 (JAXA)
- [19] [研究領域] 宇宙用デバイス開発のための電気化学界面プロセス，[団体名] 宇宙工学のための電気化学界面プロセス検討委員会，[代表者名 (所属)] 本間敬之 (早稲田大)
- [20] [研究領域] 革新的な衛星バス技術の研究，[団体名] 革新的な衛星バス技術の研究 RG，[代表者名 (所属)] 福田盛介 (JAXA)
- [21] [研究領域] 深宇宙航行・探査システム，[団体名] DESTINY WG、PROCYON 技術実証チーム，[代表者名 (所属)] 川勝康弘 (JAXA)
- [22] [研究領域] 超小型衛星を用いた先端技術の早期軌道上実証研究，[団体名] 超小型衛星 RG，[代表者名 (所属)] 松永三郎 (JAXA)
- [23] [研究領域] FF（フォーメーションフライト）工学，[団体名] FF（フォーメーションフライト）RG，[代表者名 (所属)] 坂井真一郎 (JAXA)
- [24] [研究領域] 低コストな小型合成開口レーダ衛星群による昼夜全天候型高頻度地球監視システム，[団体名] 多偏波衛星搭載合成開口レーダの革新的な小型化研究 RG，[代表者名 (所属)] 齋藤宏文 (JAXA)

- [25] [研究領域] 宇宙探査ミッションを支える宇宙技術実証プログラム, [団体名] 一般社団法人 日本航空宇宙学会, [代表者名 (所属)] 上野誠也 (横国大)
- [26] [研究領域] 外惑星領域の航行技術、探査技術、及び未踏の科学領域の開拓, [団体名] ソーラーセイル WG, [代表者名 (所属)] 川口淳一郎 (JAXA)
- [27] [研究領域] 海外ミッションを利用した太陽系サンプルリターン探査, [団体名] 国際共同サンプルリターン WG, [代表者名 (所属)] 國中均 (JAXA)
- [28] [研究領域] 火星表面探査, [団体名] 火星着陸探査技術実証 WG, [代表者名 (所属)] 藤田和央 (JAXA)
- [29] [研究領域] 火星探査航空機, [団体名] 火星探査航空機 WG, [代表者名 (所属)] 大山 聖 (JAXA)
- [30] [研究領域] 月惑星表面探査技術, [団体名] 月惑星表面探査技術 WG, [代表者名 (所属)] 橋本樹明 (JAXA)
- [31] [研究領域] 月・惑星の縦孔・地下空洞探査工学, [団体名] 月惑星の縦孔・地下空洞探査技術研究会 RG, [代表者名 (所属)] 河野功 (JAXA)
- [32] [研究領域] 宇宙環境におけるエネルギー利用の開拓, [団体名] 太陽発電研究 G, [代表者名 (所属)] 田中孝治 (JAXA)

F.2 工学コミュニティから提案のあったミッション一覧

2015 年 2 月に宇宙工学の 18 のコミュニティから提示のあった主なミッション・プロジェクトを、宇宙理学分野からの主な提案も含めて表 F.1 に列挙した。「宇宙輸送分野」をはじめとし、「月惑星探査」、「天文・利用衛星」、「超小型衛星」の各分野において、豊富でかつ魅力的なミッション群が提案されており、これらをできる限り大括りにして記載した。

F.3 宇宙工学ミッション（案）

表 F.1 のミッション群から、宇宙工学が強く関係する重要ミッションと課題を抽出して、これらを遂行するための戦略として整理することを目指している。今回は、宇宙工学ミッションならびに関連ミッションの候補（案）を、表 F.2 として抽出し、1) 宇宙科学ミッション、2) JAXA 輸送系プログラム、3) 超小型衛星プログラム、に分類してまとめた。

F.3.1 宇宙科学ミッション

F.3.1.1 戦略的宇宙科学ミッション

理学関係のコミュニティの目標・戦略・工程表では、月裏側地殻探査や火星生命探査のための大型着陸探査（表面探査）が提案されており、表 F.2 ではこれらを政策的大型ミッション（L-class）と分類した。こうした大型の月・火星探査に先立って実施される工学実証としては、小型月着陸実証（SLIM）、月着陸探査、火星突入技術実証、火星着陸技術実証、が求められ、必須技術をタイムリーに取得・実証するためにも、そして、政策的な大型ミッションへと着実に進めるためにも、ボトムアップだけに頼るだけではなく戦略的に研究開発課題を設定の上実施すべきであろう。小型月着陸実験機 SLIM 以降のコーナーストーンミッションのうち、月ならびに火星着陸探査は中型（M-class）宇宙科学ミッションとして、実証が必須な工学技術とサイエンスとを組み合わせるが、戦略的

表 F.1: 宇宙理工学コミュニティからのミッション・プロジェクト提案一覧

大分類	小分類	打ち上げ時期		
		2015-2025	2025-2035	それ以降
宇宙輸送分野	イプシロン	強化型イプシロン 将来イプシロン	強化型イプシロン (部分再使用化)	民間ビジネス
	再使用ロケット	再使用観測ロケット	部分再使用ロケット	
	次世代ロケット	ハイブリッド	ハイブリッド	
	大気圏エントリ	大気圏突入・着陸実験		
月惑星探査分野	月	SLIM Resource Prospector <ペネトレータ実証>	月着陸探査 <月SR>	国際協働探査
	金星・火星圏	<火星衛星SR (MMX)> 火星着陸実証 <火星大気>	<火星着陸探査> 火星航空機探査 火星SR	
	小惑星・彗星	枯渇彗星フライバイ実証 (DESTINY) 小型衛星によるフライバイ (PROCYON follow-ons) %彗星核SR%	小惑星マルチアクセス トロヤ群小惑星探査	将来探査
	木星・土星圏	木星トロヤ群 (セイル)	木星トロヤ群SR(セイル) <%木星衛星JUICE%> 土星衛星 %土星衛星SR%	将来探査
天文/利用衛星分野	天文・観測衛星	<太陽観測 Solar-C> <CMB 偏光観測 LiteBIRD> <位置天文観測 JASMINE>	<国際赤外線 SPICA> <%国際X線 ATHENA%> <重力波 Pre-DECIGO>	
	編隊飛行	編隊飛行実証		
	衛星ビジネス	小型SAR衛星	小型衛星ビジネス	
	無線送電	無線送電実証		太陽発電衛星
超小型衛星分野	大学衛星	軌道上コンセプト実証 次世代技術者養成		

無印は工学コミュニティ、<> は理学コミュニティからの主な提案を示し、%%は海外ミッションへの参加を示す

中型ミッションの枠は10年に3機程度と厳しく制約されている。従って、月惑星探査実証機は、可能な限り小型（S-class）で実施することが望ましい。このように、惑星探査ミッションを適切な頻度で実施するためには、戦略的中型ミッションに加えて小型ミッションについても戦略的な枠組みが必要であり、輸送系の能力／コスト比率の向上や、バス機器小型化等による衛星の小型高機能化など、月惑星探査の小型化／低コスト化研究が求められている。重力天体への着陸技術についても、SLIMによる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、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（DESTINY）とがある。ソーラー電力セイルは、木星・トロヤ群小惑星探査機として戦略的中型ミッション2号機（M2）へ提案中であり、また、深宇宙探査技術実証機DESTINYは公募型小型ミッション4号機を目指して提案準備を進めている。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が、限定案は、ミッション期間が長い点が課題である。2020年代には、低コストで打ち上げ能力も向上したH3ロケットの特性を生かして、短いミッション期間とペイロード輸送能力の両立することが求められていると言えよう。従って、外惑星や小惑星探査のための戦略的中型ミッション提案については、H3ロケットの特性に基づくシステムの見直しが必要では無いか。こうした事実に加え、はやぶさや火星衛星探査（PDSR）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、そして、PDSRの次のミッションとして、月・火星等の重力天体からのサンプルリターンに挑んで行くことが求められるであろう。こうした次世代のサンプルリターンを可能とするのは、宇宙工学の全ての技術（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）であり、大型探査の技術や経験も、小型化高機能化のための開発も、すべてがなされて初めて実現できるものである。

天文衛星については、戦略的中型ミッションとして提案中の国際赤外線天文台SPICAと、CMB偏光観測LiteBIRD、そして、ESAリードの次世代X線天文衛星ATHENAがあるが、これらのいずれも、大型望遠鏡の高い指向精度要求が求められる他、極低温における観測機器運用が求められている。また、地球周回軌道のみならず、ラグランジュ点やラグランジュ点における編隊飛行観測での観測が求められるのが特長である。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、準工学ミッションとして取りくんでいきたい。

F.3.1.2 公募型小型宇宙科学ミッションならびに小規模プロジェクト

小型宇宙科学ミッションには、上記で考察したように、月ならびに火星探査のための技術実証の実施が求められている。月面着陸技術に特化した小型ミッションSLIMに続き、火星探査のための要素技術実証ミッション（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）が求められているが、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、文字通り小型・高頻度な月惑星探査へと接続する。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）をパッケージで海外のサンプルリターンミッションへと提供する計画が議論されており、NASAのNew Frontier#4の彗星核SRミッションや、NASAの大型打ち上げロケット（SLS）を想定した土星衛星SRミッションが、候補としてあがっている。いずれにせよ、戦略的中型クラスの小天体探査と、国際協力ミッションへの小規模な参加、そして、小型探査機による小天体探査とを組み合わせることで、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。

表 F.2: 宇宙工学ミッションと関連ミッション（案）

大分類	小分類	ミッション・プロジェクト
宇宙科学プログラム	政策的大型（L-Class）	< 月着陸探査 > < 火星着陸探査 > < 月火星 SR >
	戦略的中型（M-Class）	<MMS/PDSR> 火星着陸実証 木星・トロヤ群 土星衛星
	公募型・戦略的小型／国際（S-Class）	SLIM(月着陸技術実証) 火星探査技術実証（大気圏突入・火星航空機実験）# 火星探査技術実証（大気圏突入・着陸実験） DESTINY(将来深宇宙探査技術実証) フォーメーションフライト実証 PROCYON Follow-ons（小型小天体探査） %彗星核 SR% %土星衛星 SR%
	小規模プロジェクト（SP）	再使用ロケット離着陸実験 将来輸送系（ハイブリッドロケット実験機、大気圏突入実験、他） 宇宙環境利用ミッション※
JAXA プログラム	（政策的大型（L-Class）探査）	（< 月着陸探査 >） （< 火星着陸探査 >）
	輸送系プロジェクト	イプシロンロケット（強化型・将来） H3 ロケット＋上段推進系# 再使用ロケット（観測・部分再使用） 次世代ロケット（ハイブリッド等）
小型・超小型衛星プログラム	小型衛星・超小型衛星	小型衛星ビジネス 無線送電実証 超小型衛星＋打ち上げシステム

無印は工学コミュニティ、<> は理学コミュニティからの主な提案を示し、%%は海外ミッションへの参加を示す

ISAS の小型科学計画は、小型科学衛星（SPRINT バス）によって初めて可能となったが、その一方、衛星コンフィグレーションや搭載ペイロード重量要求、姿勢精度要求といった点で新たな小型科学衛星計画を推進する上で、いくつかの制約が生じているのも事実である。次の 15 年という観点から、SPRINT バスのあり方を見直し、また、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ならびに投資を目指すべき時期であると考ええる。

F.3.2 JAXA 輸送系プログラムと、将来宇宙輸送系を支える小規模プロジェクト

2020 年以降の打ち上げは、H2 をリプレイスする H3 ロケットと、打ち上げ能力等を強化した将来イプシロンロケットによって担われることになるが、コスト・信頼性・スケーラビリティ等の観点から、今後は両ロケット間で競争が繰り広げられるであろう。こうした競争を経て、H3 ロケットとイプシロンロケットが国際競争力を増し、また、両ロケットがアドバンテージを発揮する用途が明らかになっていくと期待される。月探査計画は、これら打ち上げロケットの月惑星軌道への投入能力と打ち上げコストに大きく左右されることから、探査ならびに科学分野の競争力を確保する上で、JAXA の輸送系プログラムは特に重要である。深宇宙投入能力のキー技術でありながら未だ未着手の H3 上段ステージをはじめ、探査プログラムの国際競争力を高めるための活発な研究開発、および、将来イプシロンなど小型宇宙科学プログラムによる挑戦的ミッションを高頻度に推進するために不可欠な研究開発は、宇宙理工学コミュニティが JAXA 輸送系と強く連携して推進すべき分野である。

輸送系プログラムでは、以上の基幹ロケットプログラムに加えて、新規テーマあるいは挑戦的テーマを ISAS が担うこととなる。従って、小規模プロジェクトには 2 つの役割が求められており、その 1 つが宇宙理工学実験であり、小規模ミッションとして完結した宇宙科学ミッションや、将来の宇宙科学ミッションのための試行ミッションという観点であり、そして 2 つ目が、将来宇宙輸送系のため新規技術開発と実証を進め、JAXA の宇宙輸送系全体の基盤技術を発展させるという役割である。日本の宇宙開発全体を支える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、有望なシステムを選抜して次世代輸送系のシステムへと発展させていく上で、一定規模の小規模プロジェクトは重要である。

F.3.3 小型・超小型衛星プログラムとその出口戦略

小型プログラムによる工学技術実証としては、太陽発電衛星を目指した無線送電実験が提案されているが、利用衛星を目指した実証プログラムは、革新的衛星技術実証プログラムへと集約されつつある。革新的衛星技術実証プログラムは、数機の超小型衛星の打ち上げにも適合することから、ほどよい衛星プロジェクト等で広がった大学等における超小型衛星の機会を更に広げていくことが期待される。あるいは、大学等のコンソーシアムが、超小型衛星打ち上げのための専用ロケットを持つこともあり得るだろう。こうした超小型衛星への活動に対して、ISAS がどのようにどこまで関与するかについては議論が必要であるが、いずれにせよ、このような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る。小型・超小型衛星では、ビジネスユースに耐えうる信頼性と品質の確保が求められており、こうした特性に加え、小型 SAR 衛星の提案に見られるような出口を見据えた研究開発ストーリーと、大学等と JAXA・産業界が連携した体制づくりとが求められており、連携のハブとなるべき役割を ISAS が果たすべきでは無いか。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。

F.4 宇宙工学の課題

- 月惑星探査については、重力天体探査の戦略的かつ着実なシナリオが不可欠であり、小型（S-class）および中型（M-class）の双方にて、戦略的な技術実証が求められている。戦略的中型

ミッションの枠が厳しく制約される現状では、小型科学ミッションによる技術実証をいかに実施するかがポイントとなる。

- その一方、「宇宙科学プログラムロードマップの考え方」にて謳われた「小型・高頻度な月惑星探査」が実現できておらず、今後の見通しも無いことから、形骸化しつつあり、この状況を改善しなければならない。
- 月惑星探査機的能力とコストは、宇宙輸送系能力に大きく依存することから、コスト／能力を高めた将来輸送系をタイムリーに提供することが重要である。
- 探査とアクセシビリティの観点では、未到着の木星・土星域や、これらの惑星、遠方小天体へのアクセス確立が課題。
- 小型高頻度な探査と、PDSR クラスの大型探査に必要な技術が、お互いに連動しながら、低コスト・高機能な探査や科学へと発展していくための、正のスパイラルが必要。
- 小型高機能な要素技術は、大学での発展が著しい超小型衛星・小型衛星と連携が図れないか？活性化する超小型衛星の取り組みを、科学への適用のみならず、ビジネスとして成立する出口戦略が必要。

F.5 宇宙工学分野の将来構想と実行戦略（案）

多面的かつ先進的な科学観測や太陽系探査活動（より遠くへ）に向けた宇宙への自在なアクセス（より自在に）と宇宙でのモビリティを確保し、より高度な宇宙活動を展開するため、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す。

F.5.1 宇宙工学の状況分析ならびに戦略構築の考え方

- 月惑星探査については、重力天体探査の戦略的かつ着実なシナリオが不可欠であり、小型（S-class）および中型（M-class）の双方にて、戦略的な技術実証が求められている。戦略的中型ミッションに比べて計画の機動性や自由度の高い小型科学ミッションによる技術実証を如何に実施するかがポイントとなる。
- 一方、「宇宙科学プログラムロードマップの考え方」にて謳われた「小型・高頻度な月惑星探査」を早期かつ機動的に実現するためには、イプシロンクラスの輸送系で有意な惑星ミッションを行うための、輸送、探査機双方の努力が必要である。
- 探査とアクセシビリティの観点では、未到着の木星・土星域や、これらの惑星、遠方小天体へのアクセス確立が課題。
- 小型高頻度な探査と、PDSR クラスの大型探査に必要な技術が、お互いに連動しながら、低コスト・高機能な探査や科学へと発展していくための、正のスパイラルが必要。
- 小型高機能な要素技術は、大学での発展が著しい超小型衛星・小型衛星と連携の可能性も含め、活性化する超小型衛星の取り組みを、科学への適用のみならず、民間中心のビジネスとして成立する出口戦略が必要。

- 今後の20年を視野に入れ将来に向けた革新のための研究投資は、新たな輸送や探査機のアーキテクチャの実現をもたらすであろう、新たな宇宙航行や推進、エネルギー供給、再使用型のシステム構築などの持続的な研究成果を宇宙科学の飛翔実験機会を活用することでユニークな研究活動を戦略的に展開すべきである。

F.5.2 宇宙工学の戦略

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・高度化ならびに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。

- 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（イプ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、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。
- 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、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る。さらには、自律化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。

以下には、宇宙航行輸送分野、ならびに、衛星探査気分野の長期目標と、直近20年の計画をまとめた。

F.5.3 宇宙航行・宇宙輸送分野の目標と、今後20年の計画

目標

- 打ち上げ頻度の最大化のため、ミッションの小型化・高度化（自律化・知能化）と連動し、低コスト・機動的なミッション創出と、太陽系探査科学のミッション実行可能性を拡大する。
- 深宇宙航行に関する化学、非化学推進およびソーラーセイルなどの革新的推進の洗練、深宇宙航行技術と小天体および重力天体の表面到達および表面探査に関わる技術の獲得と成熟による高度なミッションの実行が可能な状況を作る。
- 地球観測をはじめとする科学以外の打ち上げ需要の拡大と連携し、日本の小型ロケット打ち上げ機会の低コスト化・高頻度化のために、将来輸送システム構築への貢献、宇宙科学のミッション創出およびロケット技術の立場から貢献する。今後20年の計画
- 2020年代以降の日本の基幹ロケット（将来イプシロンを含む）による月惑星探査機打ち上げ能力の確保と低コスト化をもたらすため、宇宙科学における研究の立場から、小型飛翔体のプラットフォームを活用して、固体推進技術、極低温液体推進技術、システム構築技術、軽量・耐熱構造材料技術などの技術革新を図る。
- 「はやぶさ」「はやぶさ2」そしてPDSRに続く小天体探査プログラムを策定する。はやぶさシリーズの次の展開をもたらすための戦略的な開発を行い、月／火星探査技術実証、小惑星ならびに外惑星探査（DESTINY、ソーラー電力セイル）までを視野に入れた技術開発を行い、サイエンスと連携してミッションを実行する。

- 深宇宙航行を革新するためのシステム技術・推進技術・再突入・大気圏内飛行から表面到達・着陸までの技術開発を推進し、重力天体への表面到達技術の獲得を図る。2020年代の基幹ロケットと連携し最適化された国際競争力に優れた探査を実現する。
- 将来型輸送システム研究，再使用観測ロケット：再使用システム技術、新たな推進システムの研究などにより、将来型の輸送システムに求められる低コスト高頻度輸送を実現するための研究開発および飛行実証を宇宙科学の小型飛翔機会を活用して行う。

F.5.4 衛星・探査機分野の目標と、今後20年の計画

目標

- 衛星探査機技術の高度化により、その成果を反映したミッションを立案し、小型かつ高頻度な太陽系探査ミッションを持続的に実施する。
- 国際協力による補完関係構築も視野に入れつつ、特に「重力天体（月・火星・金星）の表面探査」と「小天体（小惑星など）の往復探査」を実現するための工学研究の推進とミッションの実行を目指す（月／火星探査、木星ならびにトロヤ群探査等）。

今後20年の計画

- イプシロンクラスの小型ミッションで、はやぶさ、あかつきクラスの探査ミッションを行えるような、探査機システム技術、バス機器技術の小型軽量化を行い、2020年代中期に機動的かつ工学的挑戦とシャープなサイエンス目的に絞ったユニークな小型惑星ミッションを持続的に実行する。
- 月／火星探査技術実証：月惑星表面探査技術として、自律運用（ロボティクス）、着陸、表面移動、越夜等の技術開発を推進する。
- 将来天文衛星（SPICA、LiteBIRD、DECIGO等）：遠方銀河やブラックホール、ビックバン等の解明を目指した高指向精度・大型構造物の開発と、高感度観測のための極低温冷却系の開発、等を推進する。
- 衛星バス革新研究、小惑星ならびに外惑星探査（ソーラー電力セイル、DESTINY、PROCYON follow-on、等）、新宇宙局#：衛星探査機アーキテクチャの革新、超小型化・軽量化、深宇宙航行の通信・航法・誘導・制御技術、非化学推進、ソーラセイル、宇宙空間におけるエネルギー発生・伝送技術などの革新を図り、より高度かつ自在なミッションの実現を図る。
- 1つのアイデアとしては、新規輸送系の研究開発と超小型衛星の運用とをパッケージ化する活動を、ISASも出資する大学連携拠点が中心となって実施するといった方法が考えられる。

F.6 今後の進め方

- 「宇宙工学の目標・戦略・工程表案（2015/3/26, by 宇宙工学委員会ロードマップTF）」と本稿をベースに作業を継続する。JAXA 経営層へは、現時点の情報をまとめて「コミュニティの意見」をもとにした「戦略案」として説明する。
- 「宇宙工学の目標・戦略・工程表」と本稿の内容について、各コミュニティと擦り合せを行い、合意出来たもの（＝wordの文章）・ある程度の優先度づけしたものを作成して共有するのが今後の方針。

- 並行して、宇宙理学・宇宙環境の目標・戦略・工程表と、宇宙工学のそれとの整合をとり、探査戦略等については、ISASの宇宙探査プログラム検討チームで議論する。
- 2015年12月18日の宇宙工学委員会後は、宇宙工学委員会のタスクフォースを再度立ち上げ、「宇宙工学ロードマップ」word文書の調整に入る。宇宙工学ロードマップは、年度内の完成を目指す。

G.Appnedix1 宇宙工学ロードマップの概要（2015年3月版）

宇宙工学分野の目標・戦略・工程表の分析結果をもとに、宇宙工学の目標・戦略・工程表案を、3つの分野についての概要を準3Dガンチャート形式でまとめたものを図F.1, F.2, F.3に示す。ただし、具体的なミッション名を多く記載したため現状版はexample的な扱いと考えていただきたい。

日本の宇宙輸送分野のビジョン

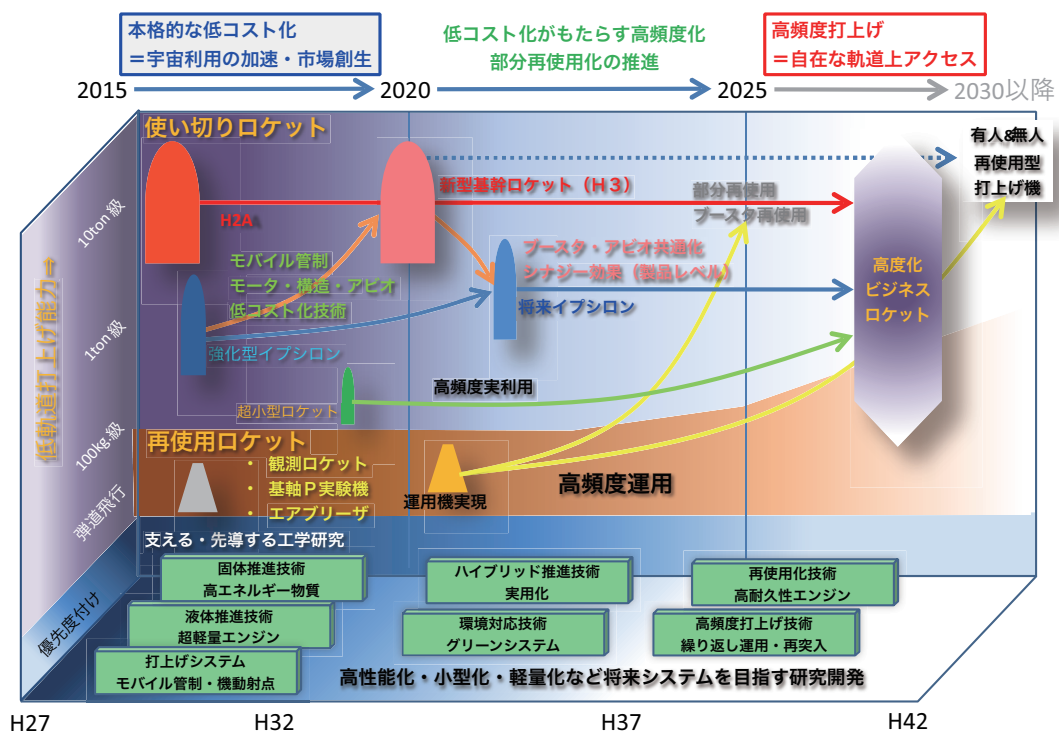


図 F.1: 宇宙輸送分野のビジョン

地球周回・近傍衛星（L2含む）

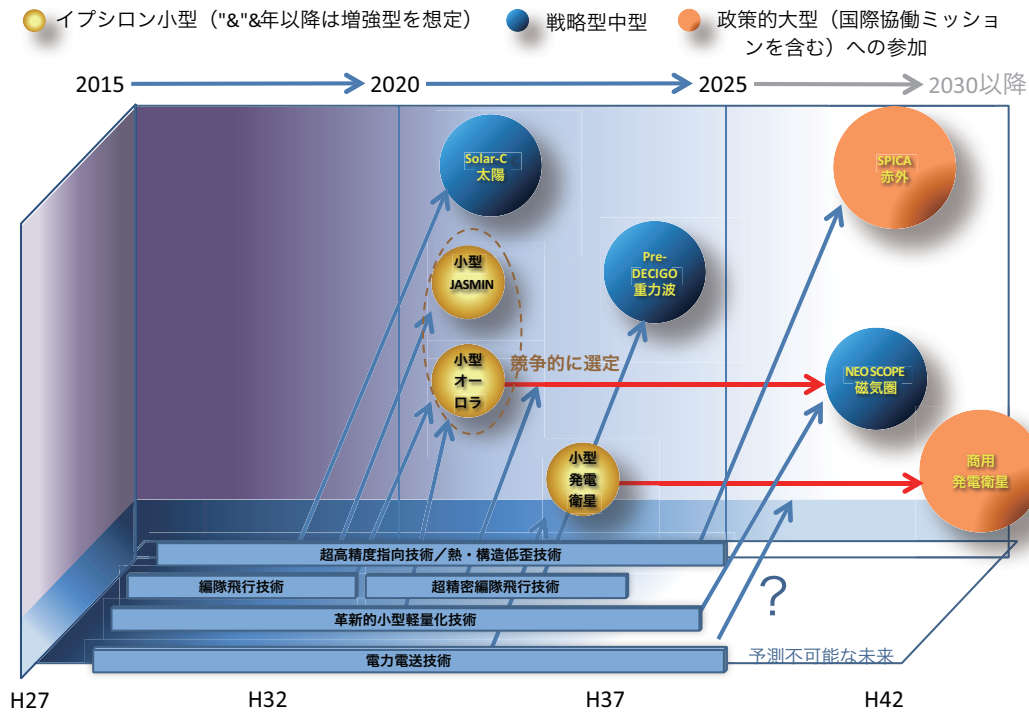


図 F.2: 地球周回衛星に関する宇宙工学分野のビジョン

太陽系探査プログラム

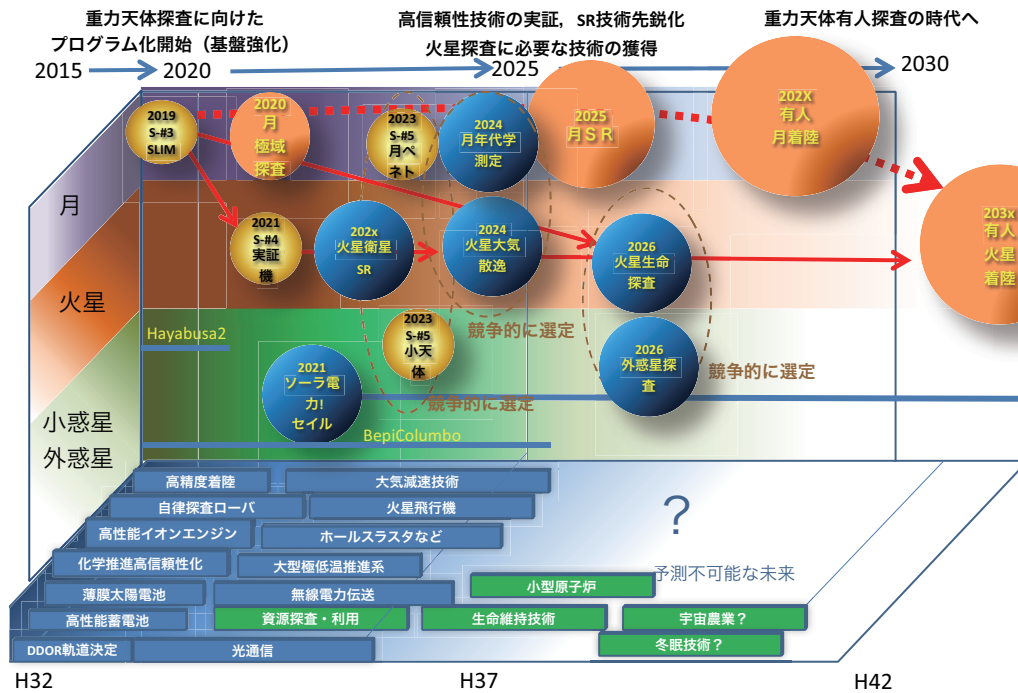


図 F.3: 太陽系探査に関する宇宙工学分野のビジョン

G.Appnedit2 宇宙工学における技術開発

宇宙工学の目標・戦略・工程表としてはミッション提案に関するワーキンググループからの提案がほとんどであった。リサーチグループからの技術開発提案は2件に留まっている。今後は、ミッションロードマップを実現する上で必要となる技術研究開発における戦略と工程表を打ち立てる必要があることから、熱・構造・制御・空力等の基盤研究コミュニティからも意見を頂く必要があると認識し、ご意見を伺おうとしている。表 F.3, F.4 に、二つのリサーチグループからの技術要素の工程表案を示す。

表 F.3: 月面表面探査技術 各要素技術の工程表案

	～5 年後	5～10 年後	10～20 年後
1.高精度航法	地形照合航法の高精度化 Flash LIDAR 開発		
2.着陸機構	衝撃吸収材高性能化	アクティブ制御着陸脚	
3.不整地走行	走行系改良	垂直移動機構	
4.飛行移動		投擲などの飛翔移動	飛行機離着陸
5.自律探査	自律走行アルゴリズム		
6.エネルギー	再生型燃料電池	無線伝送	
7.耐環境	レゴリス防塵		
8.機構・材料	機構・材料選定	構造物試作	
9.小型プローブ	改良研究		

表 F.4: 革新的な衛星バス技術の研究 工程表案

研究項目	目標 対アノ	FY2014 (実績)	FY2015	FY2016	FY2017	FY2018	FY2019	FY2020	FY2021
マイルストーン				▲ERG			▲47102#37		▲47102#47
①MEMS 3次元実装技術を用いた超小型CPU基盤の研究 (担当: 福田、三田、尾崎ほか)	(A)	システム検討、モジュール試作(10)	超小型CPU基盤の設計・試作(35)	耐環境性評価(35)					
②姿勢制御系SpaceWireインタフェースモジュールの小型軽量化検討 (担当: 福田、坂井真、尾崎ほか)	(A)	回路集積化検討/実装試作(7.5)	電源スライス小型化・回路集積化、機殻内蔵化検討・試作評価(40)	電源スライス小型化・回路集積化、機殻内蔵化検討・試作評価(40)					
③MEMSジャイロの衛星用IRU化検討 (担当: 坂井真、三田、福田ほか)	(A)	MEMSコア試作、データ評価(5.5)	システム化検討、耐環境性評価(10)	コンポーネント開発: 基本設計、EM製作・試験、詳細設計、FM製作・試験(150~200)					
④可変推進系技術の検討	④-1 セラミック・チタン接合スラスト (担当: 佐藤、澤井、中澤ほか)	(A)	セラミック・チタンのう付け試作、熱衝撃試験・引っ張り試験(2)	スラスト試作・評価: 知ノズルで燃焼試験、接合ノズル製作(18)	スラスト評価: 接合ノズルで燃焼試験(6)				
	④-2 高性能低毒性スラスト (担当: 堀、膳所、澤井、中澤ほか)	(B)	可変チャンバ内でのスパーク放電等による電火条件の検討(1.5)	可変化スラスト製作、燃焼試験設備の整備、燃焼試験(4)	BMスラスト製作、評価試験(3)				
⑤電気試験効率化の検討 (担当: 松崎、福田ほか)	⑤-1 汎用な単体試験システムの開発	(B)	(準備)	システム開発(20)	システム開発(20)				
	⑤-2 搭載ソフトウェアの自動生成ツールの改良		システム開発(3)	システム開発(17)	システム開発(17)	システム開発(3)			
	⑤-3 想定外事故の監視		(準備)	(準備)	技術検証(5)	技術検証(5)	技術検証(5)		
	⑤-4 試験の網羅性の計画・向上		(準備)	(準備)	(準備)	技術検証(5)	技術検証(5)	技術検証(5)	技術検証(5)

付 録 G 宇宙環境利用科学

G.1 目標・戦略・工程表

本章は、宇宙環境利用科学分野の目標・戦略・工程表の分析結果をまとめたものである。分析対象とした文書を以下に示す。

宇宙環境利用科学分野の目標・戦略・工程表

- [33] [分野] 宇宙環境利用科学 [提出団体] 宇宙環境利用専門委員会 [代表者] 石川 正道 (2015 年 12 月 22 日)
- [34] [分野] 微小重力科学 [提出団体] 日本マイクログラビティ応用学会 [代表者] 石川 正道
- [9] [分野] 宇宙生命科学 [提出団体] 一般社団法人 日本宇宙生命科学会 [代表者] 高橋 幸秀
- [35] [分野] 宇宙植物科学 [提出団体] 宇宙植物科学研究者コミュニティ (一般社団法人 日本宇宙生命科学会 のサブセット) [代表者] 保尊 隆亨
- [36] [分野] 宇宙における植物の生活環 [提出団体] 宇宙環境利用科学委員会 RT「宇宙における植物の生活環」 [代表者] 唐原 一郎
- [37] [分野] 宇宙におけるコケ植物の環境応答と宇宙利用 [提出団体] 宇宙環境利用科学委員会 RT「スペース・モス」 [代表者] 唐原 一郎
- [38] [分野] 宇宙医学研究：マウス生体諸機能の調節における重力の役割追求 [提出団体] 宇宙航空環境医学会：宇宙医学研究グループ [代表者] 後藤 勝正

G.2 宇宙環境利用科学の特殊性

本まとめでは、提出していただいた目標・戦略・工程表からそれぞれの分野の科学の大目標を抽出し、そこから大目標を達成するための中目標、さらにそれを breakdown した個々のプロジェクトが狙う小目標という流れに再整理している。一方、これまでの宇宙環境利用科学は、微小重力科学分野の目標・戦略・工程表が最上位の目標を、「宇宙環境利用科学は、微小重力という宇宙でしか得られない環境をツールとして、地球社会に貢献する 科学技術を構築する」[34] と定義していることからわかるように、「宇宙環境利用」という共通の手段によってまとまった分野であった。日本マイクログラビティ応用学会、宇宙生命科学、宇宙植物科学の各代表と、宇宙科学・探査プログラム検討チームメンバーとの間の議論でもこの問題は取り上げられ、その後の宇宙環境利用コミュニティの議論を経て、宇宙環境利用科学分野全体の [34][33] を、12 月 14 日に提出していただいた。以下は、[33] に基いてまとめたものである。

G.3 宇宙環境利用科学の大目標と post ISS のすすめかた

これまでの宇宙環境利用科学は、ISS を利用した実験を実施の最終目標として、微小重力場に特有な物理科学および生命科学現象を解明すると共に、得られる知見を地球社会の課題解決にフィードバックすることを目標としてきた。今後の 20 ないし 30 年を視野に入れた宇宙環境利用科学は、大目標として「宇宙惑星居住科学」を設定し、post ISS の当面の実行戦略として、月および月周回軌道を設定している。この戦略設定の理由は以下のように整理できる。

- 月面の重力場（0.17G）は、0G と 1G を補間する重力場であることから、ISS で行われた微小重力科学研究の成果の実証・発展を可能とする。加えて、極低温、低磁場、太陽放射線など月環境固有の特性と組み合わせることによって、地球環境では困難な科学研究（物理科学、生命科学、応用科学）を推進できる。
- 宇宙惑星居住科学の次の対象として、ISS の次の人類の活動の場の最有力候補である月が適切であり、資源開発・利用や我が国の月探査計画とも整合する。

G.4 post ISS に推進する研究と戦略

当面はこれまでの継続として ISS での研究もすすめつつ、20 年-30 年先を見据えた地球周回・月周回軌道、さらに月表面での実験実現に向けた準備を戦略的にすすめる。宇宙惑星居住科学は、微小重力科学と宇宙生命科学の二つの分野に分けて考える。それぞれの目標とそれを実現するための個別の目標として以下が設定されている。

- 微小重力科学
 - － 微小重力、高真空、低温など宇宙特有の環境条件をツールとして、人類の活動を惑星空間にまで拡大すると共に、地球社会に貢献する科学技術を構築する。

そのために以下を行う。

- (1) 月面上の微小重力対照実験および月資源利用等に係る技術を開発し実証する。（月軌道周回実験・観測衛星）
 - (2) 低重力環境を用いた科学研究
 - (3) 月環境に固有な科学研究
 - (4) 月資源利用技術の開発実証
- (2)–(4) の目的のために、月面理工学ラボの構築をめざす。

- 宇宙生命科学
 - － 生命の起源やその地球環境への適応、進化の本質的なしくみの解明
 - － 人類が宇宙に進出するために必要な基本的知識・技術の獲得
 - － 地球の急激な環境変化への適切な対処による環境保全と、人類の長期生存の実現
 - －

そのために以下を行う

- (1) 月面上で行われる生命科学的研究および生命維持システム等に係る微小重力対照実験と技術開発実証。（生命科学観測衛星）

- (2) 太陽系惑星環境での生物生存性、閉鎖型生命維持技術など。(月面生命科学ラボの構築をめざす)

月面理工学ラボ，月面生命科学ラボを 30 年先に目指しているが，そこで行うべきサイエンスは，地球周回や月周回ミッションを利用した技術開発と準備ミッションにより明確化してゆく戦略である．月面理工学ラボ，月面生命科学ラボの概念は我が国および国際的な月探査計画の伸展に強く左右されると予想されるので，地球周回や月周回ミッションを利用した技術開発と準備ミッションを明確なサイエンス目標をもって着実に実行してゆくことが重要であろう．

G.5 まとめ

宇宙環境利用科学は，元来は「宇宙環境利用」と，ISS という共通の手段によって定義された研究分野である．これまでの延長線上にある ISS を利用したプロジェクトは進めつつ，今後は，宇宙惑星居住科学を大きな目標において，微小重力科学と宇宙生命科学を重点的にすすめる．月表面における低重力環境を用いた科学研究，月環境に固有な科学研究，月資源利用技術の開発実証，太陽系惑星環境での生物生存性研究、閉鎖型生命維持技術研究を 20-30 年先の大きな目標におく．これらを実現するために技術開発実証と準備ミッションを地球周回や月周回により実施する．