

## 宇宙科学の「技術」のフロントローディングという試み

2022年9月12日

山田和彦

### (はじめに)

宇宙科学研究所では、2020年度から、宇宙科学の「技術」フロントローディングという活動を開始している。これは、現状、日本の宇宙科学ミッションが抱えている、ミッションの長期化、コストオーバーランなどの深刻になりつつある課題に対して、その解決となりうる可能性のある試みであり、ある意味では、新しい挑戦でもある。私は、この技術フロントローディングの活動が開始されたときに、その最初の課題の一つとして選定された超小型探査機用のEDL（突入、降下、着陸）システムの研究開発の実施担当として、この活動に参加しながら、検討チームメンバーとして、この活動の方向性について議論してきた。そして、2021年の秋頃に、正式に、活動全体の検討をとりまとめる検討チームリーダーを仰せつかって、現在、検討チームのメンバーとともに、この活動の運用に携わり、その促進、成果拡大に努めている。本稿では、この「技術」のフロントローディングの理念、目指すべき方向性やその将来ビジョンについて紹介する。

### (「技術」が支えてきた宇宙科学)

自在かつ魅力的な宇宙科学ミッションを創出しつづけるためには、継続的な技術発展と先進的な技術が必須である。そして、世界第一級の先進的な宇宙科学ミッションは、その中で提案される魅力的なコンセプトやアイデアを実現する「技術」があってこそ成立する。それ故、宇宙科学研究所は、古くから理工一体を体現し、理学・工学が一体となって、先進的で魅力的な宇宙科学ミッションを創出し、実現してきた。理学側の高い要求によって、工学の技術レベルが引き上げられることにより最先端のミッションが実現することもあれば、工学側が提案する最先端の技術により、新しい科学・探査ミッションが開拓されることもしばしばであった。特に、2003年に打ち上げられた「はやぶさ」が最後となってしまったが、かつては、工学実験衛星（MUSES）シリーズがあり、そこで実証された技術が新しい宇宙科学・惑星探査ミッションを創出し、支えてきた実績もある。

### (フロントローディング)

近年、さまざまな分野でフロントローディングという概念が提唱され、実施されている。フロントローディングとは、製品開発プロセスやミッションの初期工程にリソースを投じ、今まで後工程で行われていた作業を前倒して進めることで、開発期間短縮、コストの低減を図るものである。JAXAにおいても、いくつかのミッションに対して、フロントローディングの考え方が適用され始めており、それらは、ミッションのフロントローディングと呼ばれている。フロントローディングの有用性は、宇宙分野に限らず、さまざまところで適用され、その効果を発揮しているという報告があるので、適切に運用できれば、その意義や効果に、疑念の余地はない。

### (技術+フロントローディング)

宇宙科学研究所では、フロントローディングの考え方を発展させた、「宇宙科学の“技術”のフロントローディング」という取り組みを開始した。この取り組みは、特定のミッションに対してフロントローディングをするのではなく、将来の宇宙科学全体にとって、重要かつ鍵となる「技術」を対象としている点で、通常のフロントローディングとは、コンセプトが異なる。通常は、宇宙科学ミッションにおいて、技術自体はゴールにはならず、技術は宇宙科学を実現するための手段と捉えられることが多い。しかし、この技術のフロントローディングでは、技術獲得自体をゴールとしている。これは、将来の宇宙科学全体を見据えた上で、重要な技術を見極め、それを先行して獲得しておくことで、単一ミッションのみならず、より効果的に、多様なミッションが創出される土壌の開拓を目指すことである。この考え方は、過去に宇宙研で行われていた、工学実験衛星の考え方に通じるものがある。

### (過去の工学実験衛星が切り開いた宇宙科学)

工学実験衛星1号機の「ひてん」は、今では当たり前になっているスイングバイ技術の習得を目的としており、さらに、惑星探査の分野で実用化されているエアロブレーキ技術を世界で初めて実証したミッションであり、惑星探査のための軌道制御技術の基盤を築いた。工学実験衛星2号機の「はるか」は、大型展開アンテナ技術の実証機であり、その技術により、宇宙電波天文学の分野を切り開いた。工学実験衛星3号機である「はやぶさ」の成果は、あらためて言うまでもないが、サンプルリターンという新しい惑星探査手法の意義・価値を世界に知らしめて、今や、サンプルリターンは、惑星探査の大きな柱となり、日本がこの分野を先導している。

### (技術が世界を変える)

一般の社会でも、技術が先行して成熟することで、想像していなかった世界が切り開かれることもある。その例として、よく挙げられるのは、携帯電話やインターネットである。これらの技術を、最初に開発した人は、今の世の中での使われ方を想像していたであろうか。これらの技術が成熟して、当たり前になったことにより、その使い方が多様化し、多くの創造的な活動が生まれ、世の中が変わっていった。このように、先進的な技術が先導して、当初は、想像もしえなかった世界が拓いていくことがある。工学実験衛星の「はやぶさ」が、惑星探査の世界を変えたように。

我々が取り組みを開始した、宇宙科学の「技術」のフロントローディングの活動は、この効果を、現代の言葉で再認識することにより、宇宙研が、工学実験衛星で体現してきた理工一体のコンセプトを、現代的にアレンジしたリバイバル版であるにとらえることもできる。

### (宇宙科学の技術フロントローディング)

あらためて、「宇宙科学の技術フロントローディング (以下、技術 FL)」とは、その名のとおりに、重要な技術に対して、先回りして取り組むことにより、先行的にそれらの技術を獲得することである。ミッションのフロントローディングと大きく異なる部分は、技術 FL は、特定のミッションに対して実施するものではなく、将来の宇宙科学全体のビジョンを鑑みて、効果が高いと考えられる「技術」、つまり、多くのミッションに共通的、かつ、将来ビジョンの実現の鍵となる技術を選定し、それらに、戦略的、かつ、集中的に投資を行い、先行的に技術獲得することを目指す点である。これにより、その技術を基盤として、魅力的かつ多様なミッションを創出し、単一のミッションへの貢献にとどまることない、宇宙科学プログラム全体に資する活動を目指している。この考え方は、まさに、戦略的に先行して獲得する技術が、新しい科学・探査ミッションを創出し、それを支えていく構図を具現化するものである。

### (技術 FL 活動の肝は?)

この技術 FL の活動の肝となるのは、取り組むべき技術の適切な選定と、そこで取り組む技術開発のゴール設定と考えている。

技術の選定には、現在、進められている宇宙科学ミッションの状況、各技術分野の技術レベルの把握はもちろんのこと、検討中のミッションの状況、先進的技術の動向、さらには、宇宙科学コミュニティ全体が望む将来ビジョンを踏まえて、総合的に選定していくことが重要であると考えている。宇宙科学研究所は、それらの情報が集約される拠点であり、各分野の代表となれる人材が集まっている。そして、技術 FL の活動は、理工一体の検討チームを結成し、私が全体をとりまとめるリーダーとして、検討チームメンバーとともに、その運用にあたっている。その中では、宇宙科学のコミュニティメンバーを含む、各種ステークホルダーからの意見を集約し、戦略的に、取り組むべき技術の選定を行い、各技術課題の実施者との対話の中で、その具体的な計画を立案し実施している。

技術 FL で取り組む技術開発のゴールは、BBM モデル等での原理検証にとどまるのではなく、EM レ

ベルのシステム、もしくは、EM レベルのコンポーネントを完成させることと設定すべきとしている。

それは、現在、宇宙科学ミッションにおける技術開発では、「死の谷」と呼ばれている研究フェーズと実用化フェーズのギャップが大きな問題となっていることが一つの理由である。研究フェーズで実施する原理検証は、研究者が自ら主導的に活動を進め、自ら手を動かしてスピーディに問題解決をすることが可能であるため、自由度が高く、低費用で、効果的に進めることができる。その成果を踏まえて、ミッションを提案し、プロジェクト化検討に進んでいくのであるが、いざ、プロジェクト化にむけた実用化フェーズ (EM 相当) の開発となると、FM 開発を見据えて、メーカ主導の開発に移行することになる。その上、品質レベル (必要な試験の種類や回数、使用する部品レベルなど) も、BBM 開発と比べ大きく異なるため、開発を進めるのに必要な予算が、桁で上がってしまうこともしばしばである。そして、現状の仕組みでは、個々の研究レベルを超える大きな予算が動かせるのは、プロジェクト化されてからとなっている。そのため、実用化フェーズの開発が実施できず、プロジェクト化できるレベルまで技術が成熟しないため予算が獲得できず、予算が獲得できないので、実用化フェーズの開発が実施できないという、ジレンマに陥り、前に進めない状況に陥ってしまう。これが、「死の谷」を生み出す要因の一つと考えられている。

技術 FL によって、その「死の谷」を埋めることが、重要な役割だと考えている。そのために、技術 FL では、BBM レベルでの原理検証はできているものの、EM レベルへ引き上げるためにコスト・労力が必要とされている課題に注力することとしている。この考え方により、より効果的かつ直接的に、ミッションの創出や立ち上げに貢献する活動となれると期待している。(宇宙科学ミッションの進め方、技術の「死の谷」、及び、それを埋めるために技術 FL の効果の関係の概念図を図 1 に示す)

## 技術FLの効果の例

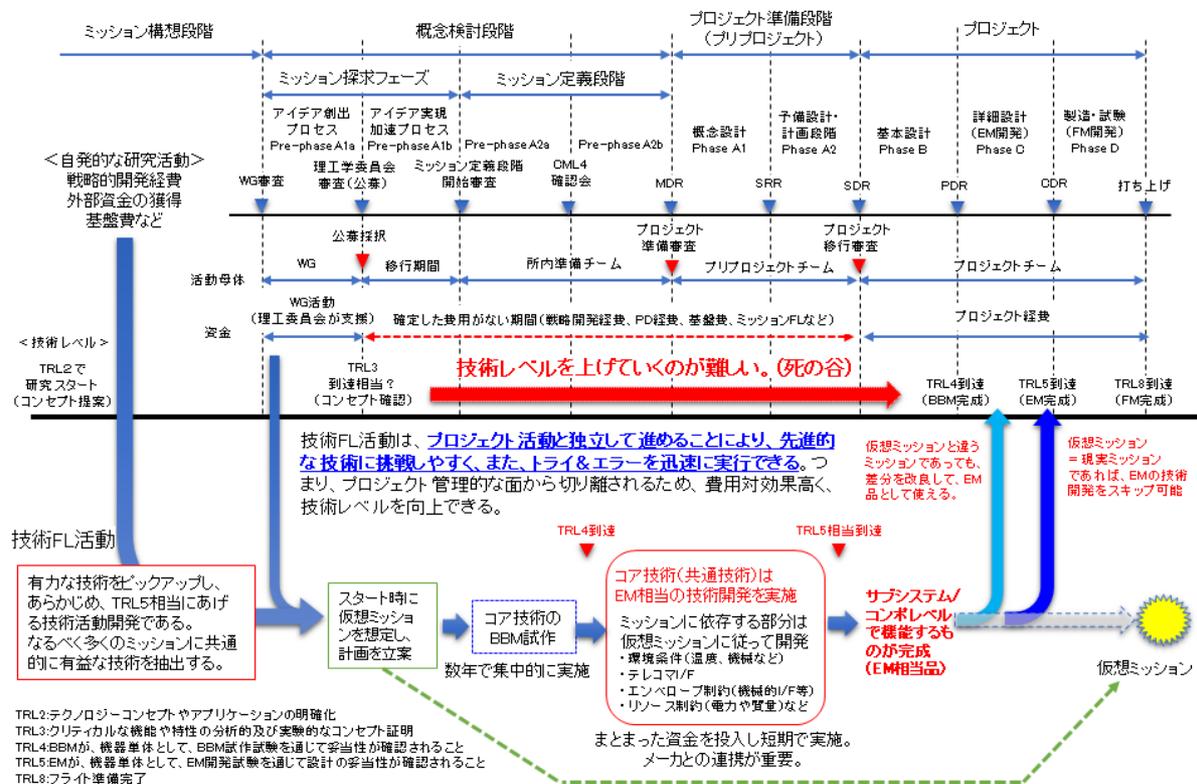


図 1 : 宇宙科学ミッションの進め方と技術の「死の谷」の概念図。そして、その死の谷を埋めるべく立ち上がった技術 FL 活動の考え方とミッションの進め方との関係図。

### **(フロントローディングの本質)**

技術 FL を進めていくあたり、もう一つ注意しなければならない点がある。それは、フロントローディングである以上、単一ミッションの単なるリソース投資の前倒しとなってしまっはいけない。フロントローディングの本質である、目指すべき最終目標（宇宙科学分野ではミッションの実現）に対して、その開発期間の短縮や、そこに係るトータルコスト、リソース低減の効果があることがこの活動の必須のアウトプットであり、それがなければ、技術のフロントローディングの本質が失われてしまうことを忘れてはいけない。

### **(フロントローディングによるプロジェクトへの効果)**

このフロントローディングの本質の部分は、その運用が適切に行われれば、自然と実現されると考えている。現在、多くのプロジェクトで採用されているウォータフォール型のプロジェクトマネジメントの考え方によると、プロジェクト開始時に、コストやスケジュールを、ある程度、正確に見極める必要がある。そのため、プロジェクトが開始してからのリスクの高いクリティカルな技術に取り組むことは、どうしてもコストがかかる。それは、スケジュールやコストなどのマネジメントレベルの制約により、挑戦的、迅速に技術に取り組むことが難しいからである。つまり、より安全側な設計によらざるを得ないので、性能の面を攻めた設計はできないし、技術リスクに対するコストやスケジュールも十分にマージンを取らざるを得ない。なので、ミッションを実現するために必要な技術のレベルが低いと、それに比してコストもスケジュールも膨らむことになる。しかし、フロントローディングにおいて、先行してクリティカルな技術を獲得しておくことができれば、プロジェクトが開始される前の段階で、技術の見通しを得ることができるので、適切なマージン（性能、コスト、期間）を設定できる。さらには、技術 FL では、各技術課題のゴールを、EM 相当の開発完了（試験評価も含む）としており、開発リスクが高いクリティカルな技術に対して、費用対効果高く、EM 相当品を開発することができる。そのため、技術 FL のアウトプットである EM 相当品を、プロジェクトにそのまま適用させることができれば、プロジェクト活動中での EM 開発をスキップできるし、そうでなくとも、EM 開発工数を大幅に削減できると考えている。このように、単一のミッションに対しても、先行的に技術開発をする、つまり、フロントローディングをすることで、開発期間やコストの低減に効果があることは明白である。

### **(“技術” FL とすることによる、さらなるメリット)**

単一のミッションにおいて、フロントローディング効果があるのは上述したとおりであるが、技術 FL がミッションから独立して行うことにより、そのメリットが 2 倍、3 倍にもなる。技術 FL では、将来のミッションに共通的にかつ鍵となる技術を選定して、先行して技術獲得を行うことができる。そのため、その技術を用いる一つ目のミッションは、当然、単一ミッションとしての効果を得ることができるが、その次のミッションでも同様の効果を得ることができる。一つの技術開発が、多くのミッションに対して同等の効果をもたらすことで、2 倍、3 倍、それ以上のインパクトとなる。これは、近年、宇宙科学の分野でも、強く意識している宇宙科学ミッション全体のプログラム化、シリーズ化と連動した考え方である。

### **(宇宙科学ミッションのプログラム化との連動)**

宇宙科学研究所では、将来にわたり宇宙科学ミッション全体を俯瞰して考えていくために、GDI (Groupe de Discussion Intensive) という組織が立ち上がった。ここでは、宇宙科学全体（天文・宇宙物理、太陽系科学、宇宙工学）に対して、将来ビジョンが統一的に形成されていくことが期待されている。そのビジョンを実現するために、優先的に行うべき技術、共通かつ重要な技術を見極め、先行的に獲得すべき集中的な投資を行うのが、技術 FL の役割であり使命であると考えている。GDI では、中型クラスのミッション中心の議論となると思うが、技術 FL 活動では、その周辺の多様な小型

クラスのミッション、小規模ミッション、海外協力ミッションなどの動きも注視しながら、宇宙科学全体として最も利益となる技術を選定し、成熟させていく。

### **(宇宙科学の技術 FL の活動方針)**

このような議論に基づいて、宇宙科学の技術フロントローディングの活動方針を、下記の通りと定義した。

---

「宇宙科学の技術フロントローディング」は、宇宙科学として、2030 年代までに実施するミッションにむけて、必要かつ優先順位の高い技術を選定し、重点的に実施する。下記①②の条件に適合しており、EM “相当” への技術成熟にそれなりの規模の費用が必要な技術課題、もしくは、将来ビジョンに適合しており、加速的に開発を進める必要があると認められた課題を重点的に実施していく。なお、直近のミッション立ち上げに、貢献度が高い技術は、優先的に実施する。

①他の基盤的な研究活動において、BBM レベルの試作・検討が進んでいる、もしくは、過去のヘリテージなどがあり、現時点での技術成熟レベルが TRL3~4 に達しており、本計画におけるゴールまでの開発計画・規模が見通せていること。

②ミッション固有の技術ではなく、新しい宇宙科学ミッションの創出に共通的に貢献する技術であり、その活動のゴールは、搭載系開発については、数年後に EM “相当” (技術的には、次のステップで FM に移行できるレベル：高級 BBM(High fidelity BBM)) の開発完了 (TRL5 “相当” 以上)、地上系開発の場合は、実践投入できる (FM の開発や運用に使用できる) レベルをゴールとする。

---

### **(技術 FL を開始して感じる課題)**

ここまで書いてきたように、「技術」のフロントローディングの理念は、現在、宇宙科学ミッションが直面している課題を解決でき、将来にむけて魅力的なミッションの創出と立ち上げに大きく貢献できるものと考えている。しかし、技術 FL の活動を開始し、多くの人意見を伺う機会があり、その意見を聞き、また、実際に活動を進めていく中で、現実的には、技術 FL が、前述したような理念にもとづいた本当の効果を得ていくには、いくつか課題があると感じている。

### **(「死の谷」の深刻さとその克服)**

技術 FL の活動の方向性の議論をする中で、現在、立ち上がろうとしているミッションが、直面している技術開発の「死の谷」の問題が深刻であることが浮き彫りになってきた。現実には、多くのチームが、「死の谷」を前にして、プロジェクト化前の段階で長期間足踏みをする事になっている。そのため、技術 FL として、まずは、直近のミッションが直面している技術の「死の谷」を埋め、それらのミッションをスムーズに立ち上げて、実行していくための支援をしていくことが、最初の使命として重要であることが見えてきた。この使命と、将来の魅力的なミッションを立ち上げるための先進的な技術を継続的、先行的に獲得していくという技術 FL として最も重要な理念を両立させる技術開発戦略の立案が必要である。そのため、それらの直近のミッションを進めるための鍵となる技術、そして、それが発展し、その先の将来ビジョンにつながるような技術を選定し、宇宙科学の全体のシナリオと整合する技術開発プランを立案し遂行していくことを目指さねばならない。これは、まさに、検討チームの技術の見極め力が問われる課題であり、我々、検討チームは、その計画立案に取り組んでいる。

**(技術 FL で獲得した技術の活用法)**

また、もう一つ重要な課題は、技術 FL で獲得した技術の実ミッションへの適用の方法である。技術 FL 活動は、基本的には、JAXA メンバが主導する形で行われることを想定している。しかし、現在、実際のミッションは、競争で選ばれたメーカーが主導で開発が行われることが前提となっているので、JAXA が技術 FL で獲得して保有している先進的な技術の利用・活動をどのように行っていくのかという点について、現時点では、明確な方法論を持っていない。技術 FL の効果を最大化する、つまり、技術 FL で獲得した技術を、有効かつスムーズに実ミッションに適用していくためには、プロジェクトの進め方の議論と連動していかなければならないと考えている。プロジェクトの中での JAXA 側の役割、メーカーとの関係性、技術実証試験の進め方などは、技術 FL による先行的な技術獲得があるという前提では、その進め方に、変更・改良が必要な部分があると考えている。今後、技術 FL の検討チームは、プロジェクトの進め方を検討する活動とも連携して、技術 FL の成果をより有効に実ミッションに活用できるような枠組、ルールも整備していくことが重要と考えている。

**(実際の技術 FL の活動)**

さて、技術 FL の活動は、開始してから 2 年目であるが、開始当初から、これまでの述べてきた理念に従って、その方向性の議論を継続的に行っている。技術 FL は、将来の宇宙科学ミッション全体に資する技術を選定すべきということが大前提となっており、宇宙科学全体目指すべき方向性は、宇宙科学・探査ロードマップにまとめられている。なので、我々検討チームは、そこから、ブレークダウンする形で、技術 FL として、取り組むべき技術の柱を定義した。図 2 は、その概要をまとめたものである。

**宇宙科学・探査ロードマップに基づく技術フロントローディングの方向性**



図 2 : 宇宙科学の技術フロントローディングの方向性と柱となる技術分野 (6 本柱)

宇宙科学分野のビジョンは、太陽系天体のその場観測、太陽圏システム探査、天文・物理観測で、そ

それぞれ将来ビジョンが示されており、それを実現する技術としては、宇宙航行の技術と遠隔観測の技術に大別される。宇宙航行技術では、自在な太陽系航行を目指す深宇宙探査船団構想が掲げられており、遠隔観測の技術では、多波長で宇宙を観測するマルチメッセンジャー構想が提唱されている。それぞれの大分類において、基盤となる技術、日本が強みとして伸ばすべき技術、将来のキラーコンテンツとなる技術という観点で、整理し、技術 FL の 6 本柱として定義した。2030 年代にむけた技術 FL 活動では、この 6 本柱を中心に技術獲得を目指していくことにしている。ただし、この 6 本の技術の柱の中でも、優先順位をつけつつ、さらに、それぞれの柱の中で、特に注力すべき技術を選別し、集中的、短期間での技術獲得を目指している。

#### (技術 FL の成果の例)

すでに、超小型探査技術の分野では、AOCS (姿勢制御系) ユニットや MEMS-IRU (慣性基準装置) のように、EM レベルの開発が完了したコンポもある。その中には、実際のミッションへの適用が決まっているものもあり、着実に成果を獲得できている。また、超小型探査機用の EDL 技術として、技術 FL 活動の中で技術レベルを高めてきている展開型エアロシェル技術においては、その技術を利用した観測ロケット実験用のデータ回収モジュール (RATS) が開発されている。そのモジュール開発の中において観測ロケットを使った再突入飛行実証試験を行うなど、小規模ではあるが、飛行実証機会を利用した実証試験を行っている例もある。

#### (技術 FL 活動のさらなる発展)

技術 FL の出口としては EM レベルの開発を目標としているが、研究課題によっては、その機能の実証するために、宇宙空間での実証試験が有効だったり、必須だったりする場合もある。現在は、昔と比べて、宇宙実証の機会は多様化しており、過去の工学実験衛星のような規模でなくても、より手軽に宇宙実証の機会を得ることが可能である。なので、将来的には、より成熟した状態で先進的な技術を提供するために、技術 FL の枠組を最大限活用した費用対効果の高い宇宙実証試験の実施も、視野にいれて、この活動を展開していきたいと考えている。

また、この活動は、宇宙科学分野に携わってきた人だけに閉じる活動ではない。“技術”という切り口で活動が定義されているため、他分野の工学技術を研究してきた人にとっても、参画しやすい活動である。それらの工学技術の一つのゴールとして、夢があり挑戦しがいのある宇宙科学・惑星探査の将来ビジョンを示し、それを実現するというモチベーションを与えることで、技術者がその研究成果を実用化できる貴重な機会とすることができる。すでに、JAXA の中の研究開発を担当する研究開発部門の研究者・技術者とは、いくつかの分野・課題で連携できており、今後も、JAXA 内外を含む多くの技術者が参加できる枠組として活動を拡大していきたいと考えている。

#### (最後に)

2020 年度から宇宙研で開始された、技術 FL の活動は、現在、宇宙科学ミッションが直面しているいくつかの課題を解決するための一つの挑戦である。そして、この活動が有効に機能していけば、直近のミッションへの貢献はもちろんのこと、将来の多様なミッションを創出していく、原動力となっていくと考えている。この活動を有効に機能させるためには、宇宙科学コミュニティメンバを含む、各種ステークホルダの意見や動向を把握し、将来ビジョンを踏まえた上、多くの人と議論し、協力して、注力すべく技術を適切に選定し、それを着実に実行していくことが必要であると考えている。そのために、検討チームメンバは、積極的なコミュニティの議論を先導し、また、タウンホールミーティングのような場を設け、多くの人々の声に耳を傾け、そしていっしょに議論していきたいと考えている。今後、技術 FL 活動が、さらに発展し、宇宙科学全体に大きな利益を生み出していけるように、挑戦していきたいと思っています。