

技術実証の継続性の確保

～高頻度宇宙科学実験プログラム構想～

JAXA 宇宙科学研究所

伊藤琢博、宇佐美尚人、尾崎直哉、小田切公秀、甚野裕明、
高橋葵、中島晋太郎、松宮久、安田博実、山下祐介

近年の宇宙科学に供する宇宙機ミッションは大型かつ長期開発となる傾向が強くみられる。これは公募型小型や戦略的の中型といった枠を問わず起こっていることであり、結果として現状の枠組みの中では中長期的な視座を持った、いわば種まきに相当する技術実証ミッションを行う余地が失われつつある。この現状を憂慮した若手有志の議論を経て、100kg 以下の宇宙機を用いた高頻度かつ短い Turn Around Time(TAT)のミッションを回すことで技術実証を加速させることが現状を打破する鍵なのではないかという発想に至った。本稿の目的は、この「高頻度宇宙科学実験プログラム構想」のより良い実装に向けて、たたき台を公開することで機構内外のステークホルダーから広く意見を頂戴することにある。拙い面はご容赦いただきつつ、是非前向きに議論させていただきたい。

1. 高頻度宇宙科学実験プログラム構想の概要

日本らしい宇宙科学ってなんだろう？この問いに対する答えは様々かもしれないが、これまでの歴史やミッションを振り返るに「とんがったこと、奇抜なこと」に挑戦し、「海外から見るとありえないこと」をやったのけて、理学・工学の双方で第一級の成果を積み重ねてきたこと、これは日本らしさと言えるのではなかろうか？

まだ開拓されていない新領域＝ブルーオーシャンを拓き続け、そこで成果を創出していくためには、新規の技術・観測手法を用いた、目の付け所の違うミッションに挑戦し続けることが必要だと考える。しかしながら、近年のミッション規模の増大、物価上昇に伴うコスト増による衛星・探査機の打ち上げ頻度の低下によって、理学・工学に共通して新規技術・観測手法の実証機会が減少していることが課題である。少なくとも本プログラム構想有志一同は、この現状に閉塞感を感じており、“なんとかして”解決したいと考えている。

予算をはじめとする現状の様々な制約がある中でも、上記の課題を解決するために、高頻度(最終的には 1 年に 1 機)のミッション機会を通した繰り返しによる進歩や、高い挑戦性となる程度は引き換えとなる「価値ある失敗」が許される規模のミッション枠組みが必要だと考える。そこで提案するのが、『高頻度宇宙科学実験プログラム』である。

- 50~100kg 級衛星
- H3/イプシロン相乗り
- 打ち上げ頻度：最終的には1年1機

このような規模、打ち上げ頻度を通して、新規技術、観測手法およびミッションコンセプトの軌道上実証や、新たなインテグ方式の実装、宇宙機開発手法そのものの効率化や体系構築とプロジェクトへの実装を進める。また、組織的に本活動を推進するために、JAXA 宇宙科学研究所内に、高頻度宇宙科学実験プログラム室(仮)を設置することを提案する。以降、本プログラムで提案する開発手法効率化の提案、どんなミッションができそうか、詳細を述べる。

2. 高頻度宇宙科学実験プログラムにおけるミッションと開発体制

本プログラムで行うミッションのメインターゲットは、そのミッションを遂行するにあたってバスのソフト・ハードの両面において既存のバスシステムより一段高い要求を課するようなミッションである。軌道上での重力波の検出等高度な天文ミッションに用いられる干渉計の構築に必要な精密フォーメーションフライト (FF) はその一例であり、高精度な軌道・姿勢制御や可視外でも FF を保つ高度な自律機能がバスシステムに対して要求される。

これらのミッションは既存のバスシステムに対する開発の差分が大きく技術的な見通しを開発初期段階で立てられないばかりか、従来の枠組みで想定される JAXA・メーカ間の役割分担では対応しきれないことも想定される。こういった技術的難度の高いミッションを遂行するために、より内製比率を高めインハウス的な開発体制を敷くことが不可避であると考えている。一口に「インハウス」「内製比率が高い」と言ってもそこには粒度があるため、ここでは我々が検討にあたって着目した論点を紹介し、今後の議論のたたき台としたい。

本プログラムは、「コンポーネント単位にとどまらない、衛星システム全体としての実験プログラム」とすることで、新規の技術・観測手法を高頻度の実証・実験することを目指す。新規の技術・観測手法の中には、先にあげたミッション例のように宇宙機のバスシステムに対する要求や仕様をインタフェースとして明確に切ることができないようなものも存在する。このような新規技術を積極的に活用して高頻度にミッション・実験を実施するためには、インテグレーションまで見据えたシステム設計を自分たちで実施できることが重要である。すなわち、システムレベルの設計・仕様策定からインテグレーション・検証まで一貫して行うことが望ましい。また、サブシステム・コンポーネントについても、自前主義、すなわち必要な新規技術を取り込んだコンポーネントやソフトウェアを高い内製比率で開発する

ことが避けられない場面も出てくると考えられる。

以上を踏まえ、本プログラムの開発体制は「実験内容を達成できる衛星システムを自分たちで設計し、自分たちのコントロールのもとで製造・検証までできること」を満たす必要がある。これに対して、サブシステム・コンポごとの要求検証体制を参照するいわゆる「二次元V字モデル」を念頭にあるべき内製比率を探っている。この体制、ひいては必要十分な内製比率は実験内容（ミッション）やパートナーとなりうるメーカーによって変わりうるが、プログラムを進めていく中であるべき姿を見つけていきたい。

3. 高頻度宇宙科学実験プログラムだからこそできる技術実証

高頻度宇宙科学実験プログラムでは、先ほど述べた通りインハウス成分の強い開発を行うことを提案している。これは予算都合という境界条件から強いられているものではない。この開発体制だからこそできる技術開発・実証があり、それをこのプログラムでやっていくべきであるという強い動機からくるものである。すなわち、①開発方式そのものの探求、②設計・検証プロセスのデジタル化、③バスシステムの根幹にかかわるミッション技術の三つである。

50—100kgの宇宙機は、その境界条件からシステム構成が強く制約される。そのことを踏まえた上で、従来のV字モデルに変わりプロトタイプベースの開発方式をコンポーネントやバスシステム単位等部分的に導入することは、制約の中の自由度を可視化させ、ミッションにおいて実現できる機能性能の最大化につながる可能性がある。また、高頻度な打ち上げ機会はコンカレントエンジニアリングの導入を可能とし、開発サイクルそのものよりも短TATでの宇宙機システムの改善をもたらしうると期待される。

設計検証プロセスのデジタル化は、全面的なMBSEやデジタルツインの導入を目指すものである。システムやサブシステムのみならずコンポ単位での開発をインハウスで行うことで、要求から検証までを一気通貫にデジタル空間で取り扱うことが可能となる。これにより、サブシステムやコンポーネントの設計検証サイクルの一部について試作を介さずに高速に回すことができることが期待される。

バスシステムの根幹にかかわるミッション技術とは、先の節でも述べた通り、バスシステムに対して新たな要求を課し、ソフト・ハード問わず既存アセットの再利用を許さないようなミッション技術を指す。高精度な軌道・姿勢制御や可視外でもFFを保つ高度な自律機能が要求される精密フォーメーションフライト（FF）や、高度な熱制御・姿勢制御を要求する

望遠鏡、探査機の運用の省力化やコンステレーションを目指した完全自律化などがあげられる。これらのミッションは従来の形態で実施するにはリスクやコストが過大になる傾向がある。このプログラムの実証を通じてこれらのミッションを実現するために必要な設計論を獲得できれば、将来の挑戦的な公募型小型や戦略的中型相当のミッションを技術的見込みをもって提案していくことが可能になるはずである。

4. 高頻度宇宙科学実験プログラムにおけるミッションの進め方

観測ロケット実験や大気球実験のように、「1年に1機」に近いペースでの宇宙科学実験を想定する場合の思考実験を行ってみる（あくまで「思考実験」であることにご留意頂きたい）。最初の5年間をプログラムの「試行フェーズ」、以降「定常フェーズ」へと移行することを想定した場合のスケジュール例を以下に示す。

宇宙科学実験プログラムのスケジュールについて思考実験した例。

EM：エンジニアリングモデル、FM：フライトモデルの開発を表す。

項目	FY2025				FY2026				FY2027				FY2028				FY2029				FY2030				FY2031	FY2032	FY2033	FY2034	FY2035
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q					
1号機			概念検討		EM				FM				★運用																
2号機					概念検討				EM								FM				★運用								
3号機													概念検討				EM				FM			★運用					
4号機																	概念検討				EM			FM	★運用				
5号機																					概念検討			EM	FM	★運用			
6号機																							概念検討	EM	FM		★運用		

まず思いを巡らせるのは高頻度な実験機会がもたらすメリットである。頻度が低下すると、科学成果を最大化するため1回の貴重な実験機会にたくさんのことを詰め込む方に傾きがちであり、実際この気持ちは理学・工学のPI候補たちに広く共有されるものであろう。ただそのような総花的なミッションを企画することで、開発の規模や難易度は増していく。開発規模が大きくなると、技術的リスクが大きい挑戦を敬遠する傾向も強くなる。高頻度な実験機会があれば、「1度の大ジャンプ」に全てを賭けるのではなく、「ホップ・ステップ・ジャンプ」方式で段階的に発展させ易くなるのはもちろん、敷居が下がることで宇宙科学に関わるプレーヤ（大学や企業等の研究者・技術者を含む）の裾野も格段に広げられるのではないかと考える。

一方、高頻度な宇宙科学実験プログラムを現実の実装するにあたり課題もいくつか予見される。第一に、頻度を維持するための開発体制である。例えば図中の2031年度を見ると、衛星運用と、打上げを控えた衛星のFM開発、EM開発、等が同時並行的に進むことになるため、異なる開発・運用フェーズを支える充実した体制構築がカギとなる。実際に高頻度に開発・運用に成功している民間企業の先行例等も参考とすることで、実現性が見えてくるの

ではないかと考える。第二に、打上げ機会の確保である。高頻度な実験を念頭に置く場合、地球低軌道の相乗り等で実現可能なミッションをベースとすることは合理的ともいえる。一方で低軌道ミッションのみでは実証できる技術が縛られることも懸念されるため、不定期に実施される国内外の深宇宙探査の相乗り機会を獲得する等、多様なミッションができるような幅広さも考慮できるとよい。

他にも、1つのミッションあたりに新規開発をどの程度盛り込むかは開発期間や実施頻度に影響するだろうし、宇宙研の大学共同利用プログラムの性格を発揮しアカデミアの積極的な参加を呼び込むことができるかや、技術を持ったメーカとどのように協働していくかといった点についてもプログラムを魅力的にするためには重要な要素となるだろう。

5. おわりに

本稿では、高頻度な技術実証プログラムの必要性を述べつつ、その実装がどうあるべきかについて検討した内容を紹介した。内製比率を高めることは各レイヤーの技術を自由にハンドリングすることを可能とし、結果として高度な技術実証を行う機会をもたらす。ただしプログラムの実際の形態や頻度は資金や人的リソースといった境界条件に強く制約され、上に述べた内容のうち実現するのはごく一部になるのではないかという懸念もある。そのような現実に対して斜に構えることなく、宇宙科学の将来のために今できることをやる一念こそが必要とされていると信じてやまない。また、本プログラムは宇宙研ひいてはJAXAで少なくなりつつある、実際の「宇宙の現場」に触れる場となる。これは修行の場を求める学生や職員にとって待望の機会には間違いなく、我こそはと思う方々の積極的な参加を期待している。

また、宇宙科学実験プログラムの内容についてはプログラムの名称も含めすべて議論の俎上にある。本稿で述べた構想は、これから先このプログラムを作っていく仲間とともにあるべき姿を探っていくたたき台であり、これをもとに今後宇宙科学の将来に資するプログラムを整備していければと思う。

付録：ワークショップで提示された論点について

去る 2025 年 6 月 30 日に「高頻度宇宙科学実験プログラムワークショップ」を開催し、主に宇宙研在勤の職員や学生向けに本構想を紹介し議論する機会をいただいた。そこで提示された論点について紹介したい。

本プログラムは短期で数多くのサイクルを回していくことで宇宙科学ミッションの理想と現実のギャップを埋める一助となるべきである。参加者からは高頻度であることで技術実証のハードルが下がることへの期待が示された。また、短期かつ期間を区切った開発によってリスクをとることが許容されうるのであり、開発を間延びさせずにサイクルを回すことが重要であるとの示唆を受けた。また、このプログラムにおける実証結果を通じて国際的なビジビリティを獲得し、将来の国際協力ミッションへ接続することができるのではないかという展望が示された。

本プログラムにおける「教育」の在り方については多くの意見が出された。短期開発かつ高頻度であることで、今までの長期のプロジェクトへの参加と異なり、プロジェクトの前フェーズの経験ができることが魅力であるとの視点が提示された。また、学生の参加に際する教育体制が整備されうるのかという疑問に対し、気球実験の経験から自ら学ぶ姿勢こそが重要であると示唆された。そもそも教育目的であることを強く主張する是非についても議論が及んでおり、むしろミッション内容に重きをおくことでモチベーションが上がるとの意見も出されている。

本プログラムの実行上の課題についても整理が進んだ。大学やメーカとの協業について整理をすべきであるのはもちろん、JAXA 外のアイディアのミッションへの反映の仕方についても議論を進めるべきである。また、より多くのプレーヤーを本プログラムに巻き込むためにも、参加者の技術実証に対してセレクションをするのではなく、各実証要素を一ミッションとしてまとめ上げるような方法論を検討すべきであるという意見が出された。一方、組織論を突き詰めるためには時間が必要であり、立ち上げ時の今はコアなメンバーを集めた上で実ミッションを早期に進めていくことの重要性が提示された。

このワークショップを元に、宇宙研内外における本プログラムのニーズがより明確になったと感じている。いくつか指摘されたように立ち上げに至るには依然課題が多いものの、ぜひ更に多くの宇宙コミュニティを巻き込みながら、宇宙研における宇宙研究開発を通じて将来の宇宙開発技術の獲得へ邁進できればと思っている。