

超小型衛星の将来に向けて

上野 宗孝

〈神戸大学大学院理学研究科・惑星科学研究センター 〒650-0047 神戸市中央区港島南町 7-1-48〉

e-mail: ueno@harbor.kobe-u.ac.jp



科学衛星の大型化・高度化が進むとともに、特に米国において小型・超小型衛星の開発が活発になりつつあります。実利用を目的とした超小型衛星の開発が大規模に進みつつあるとともに、超小型衛星の高精度化や太陽系探査への適用と言う革新が進みつつある現在、日本の宇宙科学においても新たなプラットフォームとしての整備が重要な時代となりました。本稿では、それらの状況と背景について解説します。

超小型衛星について

宇宙科学ミッションが大型化の方向に向かいつつあるのに対して、実利用衛星のビジネスの世界では超小型衛星を専門に開発するベンチャー企業が多数設立されています。宇宙産業の構造が依然として官需主導の日本に対して、民間が民間に投資する流れが中心となりつつある米国では、人工衛星ビジネスにおいて小型や超小型の衛星が主流になりつつあります。例えば、2016年末にはソフトバンクグループ株式会社が米国のOneWeb Ltd. という企業に10億ドルの資金を出資したことが話題となりました。このように、人工衛星のマーケットも非常に多様化しつつあります。

ここで、人工衛星の規模ごとの呼び方を先に定義しておきたいと思います。昔は、通常よりも小さな規模の人工衛星のことを、大括りで『小型衛星』と呼んでいた時期もありましたが、現在では世界的に以下のように分類されています(表1)。この分類に従うと、宇宙科学研究所の「ぎんが」「ようこう」などのM-3SII ロケット時代の科学衛星や、「ひさき」「あらせ」などのイプシロンロケットを用いた科学衛星も小型衛星に分類されます。近年、日本の大学で製作されて打ち上げられ

ている衛星は超小型衛星に分類され、micro-satellite とか nano-satellite と呼ばれているクラスになります。

日本においては、九州工業大学の趙孟佑先生の研究室¹⁾ や東京大学の中須賀真一先生の研究室²⁾ が早くから系統的に超小型衛星の開発を世界的にもリードされてきており、現在では多数の超小型衛星を並行して運用されています。さらにこの技術を活用し、地球の重力圏を飛び出した深宇宙空間のミッションにも挑戦され、1年近くの科学運用を成功されました³⁾。また地球周回の人工衛星においても超小型衛星の制御技術は飛躍的に進歩しており、高空間分解能の地球観測も実現され、大型の衛星と比較すると機能は限定されるものの、大型の衛星でないと難しいと思われていた高精度観測の世界も超小型衛星で実現できる状況になりつつあります。

表1

人工衛星のクラス分類	重量	呼び名
小型衛星	100-500 kg	Small satellite
超小型衛星	10-100 kg	Micro satellite
	1-10 kg	Nano satellite
	0.1-1 kg	Pico satellite

これらの背景を受けて、超小型衛星を活用した科学を持続的に発展させることを目的に、準備・検討を進めつつあります。具体的には、科学観測可能なプラットフォームの準備として、科学観測装置を搭載可能な超小型衛星標準システムとその高度化、深宇宙へのアクセス機会の高頻度化に向けた検討、そして超小型衛星を活用できる観測装置の検討などです。詳細な内容に進む前に、科学衛星ミッションの置かれた背景を先に触れます。

科学衛星の発展と大型化

宇宙からの観測の発展は、宇宙開発の歴史と活動領域の拡大に合わせる形で歩んできました。日本では、東京大学宇宙航空研究所（現JAXA宇宙科学研究所）が日本初の人工衛星「おおすみ」を1970年に打ち上げたのをはじめとして、打ち上げロケットの大型化と人工衛星技術の高度化により、科学衛星の大型化・高度化の道を歩んできています。また、活動領域の拡大と言う点に目を向けると、M-3SIIロケットの開発により1985年にハレー彗星探査機の「さきがけ」「すいせい」を打ち上げ、M-Vロケットの完成により「はやぶさ」「あかつき」といった太陽系探査ミッションが実現することになりました。宇宙三機関が統合されJAXAとなって以降は、H-IIAロケットを活用した中型規模のミッションと固体燃料のイプシロンロケットを活用した小型衛星ミッションが展開されています。

海外においては科学衛星の超大型化が進んできており、2020年代には宇宙望遠鏡JWST（ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡、NASA/ESA）、X線望遠鏡のATHENA（ESA）、宇宙重力波望遠鏡のLISA（ESA）などが準備されつつあります。天文観測においては、より遠く・高感度に・高空間分解能で観測することがストレートな要求ですが、望遠鏡の集光力や角度分解能がスケールの2乗や1乗で効くものに対して、衛星ミッションの規模感、要求の高度化に伴う効果を含めると3乗

を超える拡大効果となります。例えばJWSTミッションはプロジェクト進行とともに開発期間が延びるとともに資金が膨張し、2018年現在では開発コストが1兆円に迫りつつあります。JWSTは極端なケースですが、天文および太陽系探査ミッションでは数千億円規模のミッションが珍しくなくなりつつあります。しかしながら、ミッションの大型化は開発期間の長期化と打ち上げ頻度の低下につながります。NASAは大型ミッションを補完する小～中規模計画として、宇宙物理分野を中心としてエクスプローラー計画（MIDEX, SMEXなど）が、太陽系探査分野においてディスカバリー計画という高頻度のプログラムが用意されています。前者の枠組みでは、赤外線での大規模サーベイを実現したWISE（広域赤外線探査衛星）ミッションや、高エネルギーX線を観測するNuSTAR（Nuclear Spectroscopic Telescope Array）ミッションが、後者の枠組みでは多様な太陽系探査ミッションに加えて、系外惑星観測に大きなインパクトを与えつつあるKeplerミッションが実現されています。

ミッションの大型化は科学的なブレークスルーをもたらすものが多い一方、その頻度が低下することにより挑戦的な観測手法や新たな観測装置の搭載の敷居が高くなる傾向を生み出します。このため、デバイスレベルの基礎開発からミッション企画・実現までのシナリオを描くことが容易ではなくなりつつあります。国内でも比較的ミッション頻度が高い高エネルギー天文分野では、観測装置開発の段階的なステップアップが戦略的に進められてきており、国内外の計画に参加する形で頻度の低下を補っているケースもあります。しかし、すべての分野でこのような状況を実現できているわけではありません。また、実際の観測衛星に加えて、成層圏の気球プラットフォームや観測ロケットの飛翔機会を活用した開発・試験観測という手法も多く分野で行われています。

宇宙機の開発について

人工衛星に搭載される装置は、地上試験においてさまざまな試験が課されます。現在は、“Test as you fly”の原則に従って実際に宇宙空間での装置の動作環境や保存環境を模擬し、実フライト運用時の動作状態を限りなく模擬したシステムのセットアップで行うことが推奨されています。この試験に加えて、打ち上げ時の機械環境（ロケットの上昇時の振動やロケット衛星分離時に発生する衝撃加速度）への耐性試験も行われます（これは一般的に非常に厳しい環境試験になります）。しかし、実際の宇宙空間で起こりうる複合的な環境やその変化を地上の試験ですべて実現することは困難です。このため、宇宙機の開発においては過去に宇宙機で運用され、機能を確認されたもの、いわゆる『宇宙実績のある装置』が好まれる傾向にあります。例えば、現在宇宙科学ミッションに用いられている、衛星システムの標準的なインターフェイスになっているSpaceWire⁴⁾を用いたシステム機器は、JAXAの小型実証衛星1型(SDS-1)に搭載されたスペースワイヤ実証モジュール(SWIM)により宇宙環境での運用実績を踏まえた後に、宇宙科学ミッションを支える衛星バスの基本インターフェイスとして採用されました。この傾向は海外の大型ミッションでも同様であり、実績のある装置およびその装置を開発した研究グループではないチームが海外ミッションの機器を担当するのは極めて厳しい状況になりつつあります。この状況は、科学衛星の頻度が低下してきた現在、科学観測装置の搭載の一步目を踏み出すことが困難になってきていることを意味します。特に科学衛星の大型化に伴い、衛星システム自身も搭載実績のあるものをベースにしたものからの変更を最小限で実現する傾向が強まり、革新的なシステムへの発展を阻害するものにもなっています。

一方、欧米を見ると、最初の項に記したよう

に、民間レベルで新たな衛星開発の世界に踏み出す流れが大きくなってきており、長期的に見た宇宙機の製作コストの削減を目指した研究開発が盛んになっています。そこで確立した技術は中～大規模の衛星開発にも取り込まれ、さらなる高度化へ向かう動きが始まっています。日本ではこのような動きがまだまだ限定的ですが、将来的にはこのような方向がメインストリームになると思われます。また、大学が主導して開発を行っている超小型衛星も機能の高度化が進んでおり、Nano-JASMINE⁵⁾のような高精度の天文観測衛星も実現されつつあります。さらに地球の重力圏を飛び出し、惑星間空間において超小型探査機で観測を行うことが可能であることが実証されています。また本特集⁶⁾でも紹介されているように、天文観測で開発された検出器の超小型化技術を活用し、天文観測衛星で端緒を拓いた観測手法を本格的な科学的アプローチとして拡大していくようなミッションも提案されています。このような流れは、科学衛星分野で培われた技術を地球や太陽系探査の世界にも展開できることにもつながるとともに、観測装置の超小型化や高性能化は、観測装置リソース制限が厳しい深宇宙からの宇宙観測と言う新たな分野への挑戦の地平を切り拓く方向にもつながります。

新たなプラットフォームの確立に向けて

超小型衛星や超小型探査機をプラットフォームとして位置づけるには、多くの研究者が敷居の高さを感じることなく宇宙からの観測に参加できる枠組みの整備が重要となるでしょう。超小型の衛星と言えども宇宙空間で運用することは大型の衛星と何ら違いがありません。このため安定的に運用可能な宇宙機を開発するには、その開発チームが宇宙機的设计・開発を十分に理解していることが必要となります。また、限られたリソースで衛星システムの高度化を実現するためには、より革新的なシステム設計を目指す必要もあります。さ

らに1機あたりの開発資金を削減することで得られる高頻度化も重要な要素です。これらの要求を満たす衛星システムを、個々のグループが1から開発することは容易ではありません。このため、科学観測装置の搭載部分に自由度をもちながら、衛星の基本システムはある程度標準化し、その部分の開発と発展については組織的に集約、一つのプラットフォームとして運用していくフレームワークを整備することが現実的な方法でしょう。このようなことが可能となれば、科学目的によっては単一の中～大型衛星よりも超小型の編隊観測のほうが新たな科学に踏み込むことができる分野も開拓されるでしょう。また、従来の気球実験や観測ロケット実験と同程度のアプローチで超小型宇宙機を活用した観測が可能となれば、より高い観測精度をもつ観測や宇宙での運用実績とその評価を行うこともできます。これらを実現すれば、将来の大型計画の立案や海外ミッションへの国際協力にも極めて有利になることは明らかです。

世界的に見て、人工衛星を打上げるロケットの搭載ペイロードの重量あたりの単価は安くなる方向にあります。大型の衛星打ち上げ時にも、打上げ余剰能力を活かして相乗りペイロードを受け入れる機会も増えてきています。このため、超小型の衛星打ち上げの機会は今後拡大することが期待できます。相乗りとして搭載されるペイロードにとっての大きな制限は、初期投入軌道の自由度が小さいことです。これは、主たる衛星ミッションの要求に従ってロケットの目標投入軌道が設定されるためです。このため、地球周回に向けた相乗りペイロードの機会は拡大しつつありますが、惑星間空間に飛び出す機会は依然として極めて少なく、今後も急速に増えることは期待できません。SLS（スペース・ローンチ・システム、NASA）の定常的な運用や、ファルコンヘビー（Falcon-Heavy、SpaceX）を活用した惑星間航行が実用化されると機会が増える可能性があります。その場合でも初期軌道投入にかかわる自由度

は限定的となることが予想されます。Google Lunar XPRIZEに参加した各チームが月への到達手段を得られないまま2018年3月31日にコンテストの幕が下ろされたことは記憶に新しいですが、これまで日本でも相乗りペイロードとして惑星間空間に宇宙機が投入されたのは2度の機会だけであり、2010年にH-IIAロケットにより金星探査機「あかつき」が打上げられた際に小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」と大学宇宙工学コンソーシアムの衛星「しんえん（UNITEC-1）」が、2014年に「はやぶさ2」打上げ時に搭載された「PROCYON」を含む3衛星が打上げられたと云うのがすべてです。日本においては、相乗りペイロードとして惑星間空間に軌道投入される機会が確定した計画は現時点ではありません。しかしながら、本特集の江副さんにより紹介されているようにGeo-X計画は地球遠方からの地球観測という新たな科学的地平線を拓くポテンシャルがありますし、超小型の宇宙機でも月周辺や太陽系探査ミッションが可能になっています。これらを本格的に展開するためには、超小型の宇宙機を惑星間空間に投入する自在性を有することが重要になります。金星探査機「あかつき」はH-IIAの2段目で直接金星への遷移軌道に投入するという太陽系探査のミッションとしては異例な方法を取りましたが、通常の太陽系探査ミッションでは、通常のロケットの上段にもう一段加速するための推進系（キックモーターやUpper stageと呼ばれる）を搭載し、地球の重力圏を脱出するための増速を行うのが普通です。地球周回の相乗り機会にも、このようなキックモーターをプラットフォームとして用意することができれば、惑星間空間に超小型の宇宙機を投入できる機会は飛躍的に増やすことが可能です。またこのようなキックモーターを開発することも不可能ではない時代になりつつあります。

宇宙科学の持続的な発展のために

科学観測衛星の高度化と大型化は学術的なインパクトを生み出すものであり重要な方向性をもつものですが、ミッション頻度の大幅な低下は観測技術や手法の持続的な発展と、それらの活動を通じた人材育成効果を大きく停滞させる側面を有しています。また、中～大型ミッションのピラミッドの下支えを行う部分が不足していることは、科学分野の粹組みとしても極めて脆弱な体制をもたらします。これまでの宇宙科学では高高度の気球実験や観測ロケット実験がこの部分を支えてきましたが、科学衛星の高度化が進んだ現在、これらの間のギャップが大きくなり、ステップバイステップ的な発展が困難となってきています。これらを補間する位置づけとして、超小型衛星や超小型探査機の活用は、新たなフレームワークとして宇宙科学分野の持続的な発展のボトムを担う立場として期待できるでしょう。すでに、超小型衛星だから“安かろう悪かろう”という時代は終わったのです。

謝辞

本稿の執筆には、東京大学・中須賀真一先生、船瀬龍先生、北海道大学・永田晴紀先生、首都大学東京・江副祐一郎先生、慶應大学・白坂成功先生、五百木誠先生からの情報を参考にさせていた

だいています。この場を借りて、感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 趙孟佑, 2015, 九州工業大学超小型試験センターレポート
- 2) 中須賀真一, 2010, 宇宙・航行エレクトロニクス, 110, 201.
- 3) 船瀬龍, 2018, 天文月報, 111, 本号
- 4) 日本SpaceWireユーザ会を参照 (<http://www.astro.isas.jaxa.jp/SpaceWire/users/>)
- 5) 郷田直輝, 2018, 天文月報, 111, 本号
- 6) 江副祐一郎, 2018, 天文月報, 111, 本号

Beginning of a New Era in Space Science with Micro Satellites

Munetaka UENO

*Center for Planetary Science, Kobe University,
7-1-48 Minatojima-minamimachi, Chuo-ku,
Kobe 650-0047, Japan*

Abstract: Scale of scientific spacecrafts is getting enormous rapidly, while utilization of micro satellites is the current trend in commercial applications in the United States. A pioneering work of the PROCYON mission, a micro spacecraft for interplanetary cruising, revealed potential of micro satellites for future space sciences. It is now time for us to establish platforms supporting “micro satellite era in space science.”