

# 超小型衛星による深宇宙探査への挑戦

船 瀬 龍

〈東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: funase@space.t.u-tokyo.ac.jp



1990年代後半あたりに端を発する超小型衛星は、特にここ数年の宇宙ベンチャーの隆盛も相まって、爆発的に増えてきている。また、地球周回軌道でのビジネス利用にとどまらず、地球重力圏を離脱し太陽系の科学観測を行う深宇宙探査の世界にも、超小型衛星は進出してきている。本稿では、超小型衛星の登場の背景と、それを可能にした技術について概観する。また、超小型衛星による深宇宙探査のこれまでの成果を紹介するとともに、今後の展望について私見を述べたい。

## 超小型衛星の登場の背景

日本の打ち上げた人工衛星の重量・サイズは、大型化の一途をたどってきた。図1に、1975年から2000年ごろまでに日本が打ち上げた人工衛星の重量を示す。大きな人工衛星では、重量が3-4トン程度と、トラック並の重量・サイズのものも出てきていることがわかる。人工衛星の大型化は、機能・性能が向上している証左でもあるが、以下に示すように、歓迎されない側面もある。すなわち、開発費の高騰（一機数百億円規模）と開発期間の長期化（5年以上）により、失敗が許されず、保守的な設計を取らざるをえず、そのため、十分な冗長系を組むなどの対応が必要となる。この傾向は、冗長系を組むことによりコストと開発期間がさらに増大し、さらに設計が保守的になってしまう、といったように加速する方向にフィードバックが働くため、大型化の傾向は加速度的に進行することとなる。また、設計が保守的になったり開発が長期化するということは、最新の技術を人工衛星に適用し技術革新を生み出すスピードが極めて遅くなってしまふということでもある。

このことを別の観点から見たのが図2である。横軸が人工衛星のシステムの規模や機能の数、性

能などを表現しており、縦軸はその衛星のコスト・重量・開発期間などを表現している。通常の人工衛星の作り方では、ある衛星を作ってミッションが完了したら、もっと高度なミッションを実施したい、あるいはもっと高機能な衛星を作りたくなる。そうすると、衛星のサイズやコスト、開発期間などが増える。人工衛星に使われる技術にイノベーションが起こらない場合（従前の技術をベースに機能・性能を発展させる場合）、①のラインのように右肩上がりの曲線を描き、あるところでコストや重量の限界に到達してしまう。多少の技術的な発展があったとしても、①'のラインのよ

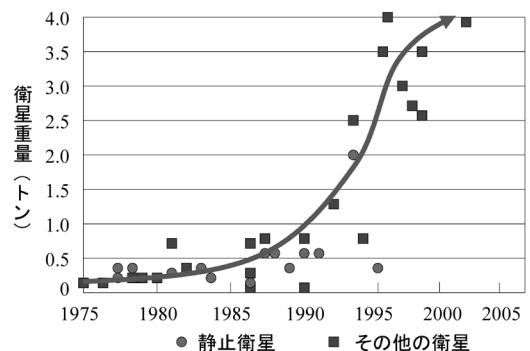


図1 衛星の大型化傾向（東京大学 中須賀真一教授提供）。

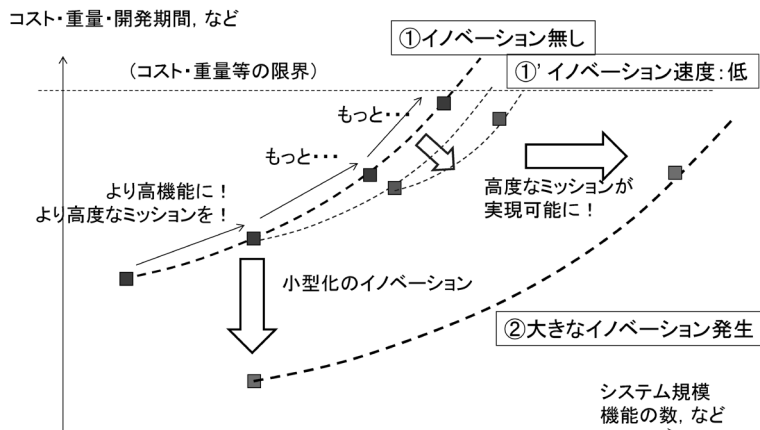


図2 小型化のイノベーションが可能にする宇宙開発の持続的な発展。

うに傾きは少し緩和されるが、遅かれ早かれ限界に到達してしまう。これまでの宇宙開発は、ある面ではこのような傾向にあるか、いずれこのようになってしまうと考えられる。

そこで求められるのは、①ないし①'のラインを大きく下に引き下げようとするイノベーションを起こすということである。ラインを引き下げるといことは、同じような機能・ミッションの衛星を圧倒的に低コスト・軽量・短期開発で実施できるようにするということであり、小型化のイノベーションと呼んでいいだろう。ひとたびこのラインが②まで下がれば、その技術を前提に発展させることにより、従来はコストなどの制約で実現できなかった高度なミッションも制約の中で実現できるようになる。このようなイノベーションを起こす・導入する試みを継続的に実施していくことが、持続的に宇宙開発を発展させるためには重要であると筆者は考えている。

このような背景を踏まえて登場してきたのが、図1において右下、すなわち小型軽量化の方向を目指した小型衛星・超小型衛星である。重量が100-500 kg ぐらいの衛星が小型衛星と呼ばれ、50 kg 程度以下の衛星を超小型衛星と呼ぶ。小型衛星であればおよそ数十億円、超小型衛星であれば数億円以内の開発コストが現在の相場である。

## 超小型衛星開発に関するこれまでの取り組み

東京大学の筆者らの研究グループは、2000年ごろから超小型衛星の研究開発に取り組んできた。図3に、これまでに開発し打ち上げてきた超小型衛星を、そのミッションと打ち上げ年（西暦）と合わせて示す。これまでに8機の衛星を開発し、7機の打ち上げ・運用に成功してきた（1機は開発を完了し、打ち上げ待ちの状態）。最初に開発したのが、10 cm立方、重量1 kgのCubeSat（キューブサット）と呼ばれる超小型衛星である（図4）。当時、このような極めて小さな人工衛星の研究開発が大学を中心に世界中で取り込まれつつあり、2003年に打ち上げたわれわれのCubeSat（名前は“XI-IV”（サイ・フォー））が世界初の打ち上げ・運用に成功したCubeSatとなった。この衛星開発プロジェクトでは、大学レベルの研究費の範囲で実施するという制約から、高コストな宇宙用の高信頼性部品は使用できず、民生の電子部品を組み合わせる必要があった。

その際の工夫の一つが、部品の宇宙環境耐性についての考え方を従来とは変えているということである。従来の人工衛星では、部品単体として放射線耐性を確保するために、宇宙用の高価な部品

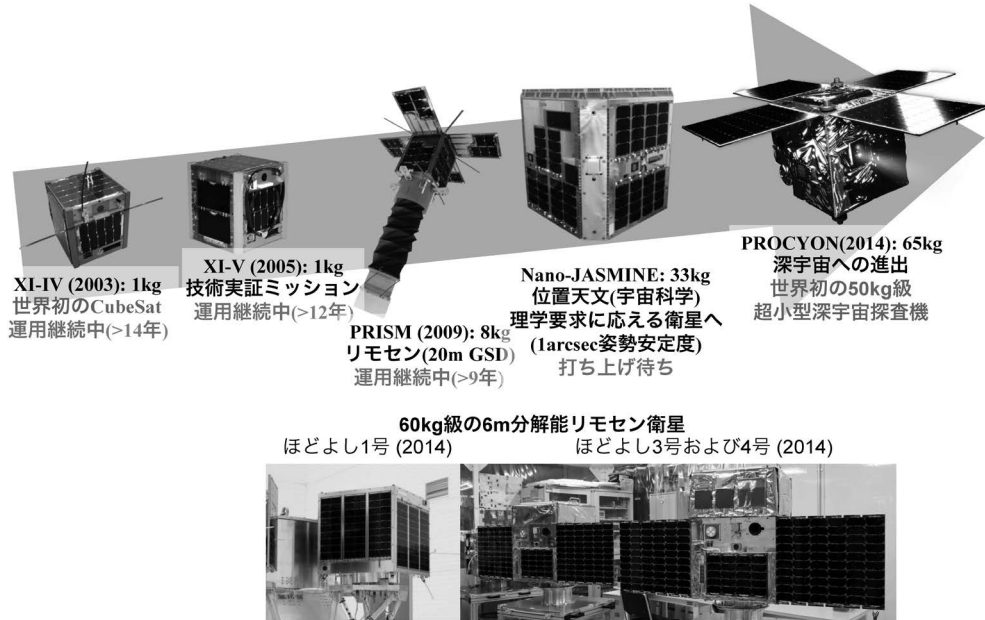


図3 東京大学におけるこれまでの超小型衛星開発の取り組み。

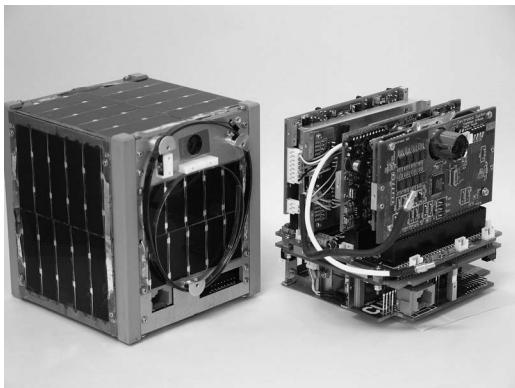


図4 10 cm立方, 1 kgの超小型衛星 CubeSat “XI-IV” (2003年打ち上げ)。

でシステムを構成することが基本であったが、民生品をベースとする超小型衛星では、部品単体としての放射線耐性は十分には期待できないため、システムレベルの設計で工夫している。例えば、CPU間の相互監視システムを設けることにより、放射線起因の一時的な誤動作から復帰できるようにする設計や、放射線起因で発生する過電流を防止する電源保護回路の設計など、放射線による異

常を発生させない（従来の考え方）のではなく、確率的に発生したとしてもシステムが死なないような工夫をするわけである。ただし、確率的な現象ではなく、放射線によって部品が劣化して故障してしまうトータルドーズ効果に対しては、すべての部品の耐性を検証した上で衛星に使用が必要がある。もう一つの工夫は、部品やシステムの信頼性をどのように担保するかという考え方の転換である。従来の衛星システムの作り方は、システム全体の故障確率を一定レベル以下に抑えるために、宇宙用の高信頼性部品を使用し、部品単体の偶発的な故障確率を極めて低く抑える、という考え方である。一方で、超小型衛星では、衛星の故障は必ずしも偶発的に発生する類の事象に限定されず、設計不良、すなわち、部品の使われ方がよくないために部品の故障を発生させてしまう事象も比較的高い確率で発生してしまう、という考え方に則っている。特に、今までにないような新しいミッションを実施するような場合はその傾向は顕著であると考えられる。その場合、部品の品

質を確保して偶発的な不具合発生確率をいかに抑えたとしても、ある程度の確率で設計不良に起因して衛星が故障してしまうことが予想される。このような設計不良をなくすべく地上の技術者が徹底的に検討したとしても、打ち上げてみて初めて気づく問題もある。超小型衛星では、民生品を使用することで、部品の信頼性はほどほどのレベルで妥協しながら、小型・軽量・低コストに衛星を作り、打ち上げ回数を稼ぐことで、設計不良の発覚・改善・再挑戦のPDCAサイクルを早く回すことを重視している。例えば、宇宙用部品のようにロット単位で部品の品質を保証することはせず、使用する部品単体の健全性を十分に地上試験で確認することで初期不良品が紛れ込むことだけを防ぎ、初期不良除去後の偶発故障発生の確率には目をつぶるという大胆な方針をとることもある。

このように、民生の最先端の小型・高性能なエレクトロニクス、つまり、いわゆる宇宙用ではない技術を、(必要に迫られて)「うまく」導入する

ことで、同種の機能・性能をもつ人工衛星を圧倒的に小型・軽量にすること、すなわち、図2における既存のラインを大幅に下に引き下げることに結果的に成功した。ここでの民生品をベースとする衛星設計の基本的な考え方は、後継の各種超小型衛星ミッションにおいても引き継がれている。

このような苦勞をして作り上げたCubeSatは、当時珍しかった相乗り打ち上げ機会を幸運にも得ることができ、ロシアのロケット(ROCKOT)にて2003年6月30日に打ち上げられた。衛星の管制(電波を介して衛星に指令を送信したり衛星の健康状態や観測データを受信すること)は、東京大学の研究室の建物の屋上に設置したアンテナを介して実施し、打ち上げ後の衛星の健康状態を確認することができた。衛星に搭載した小形の地球撮影用のカメラも正常に動作し、図5に示すような画像を打ち上げから14年以上経過した現在も継続的に取得できている。

2003年のCubeSat初号機の成功以降、より実用的なミッションを実施できるようになることを目

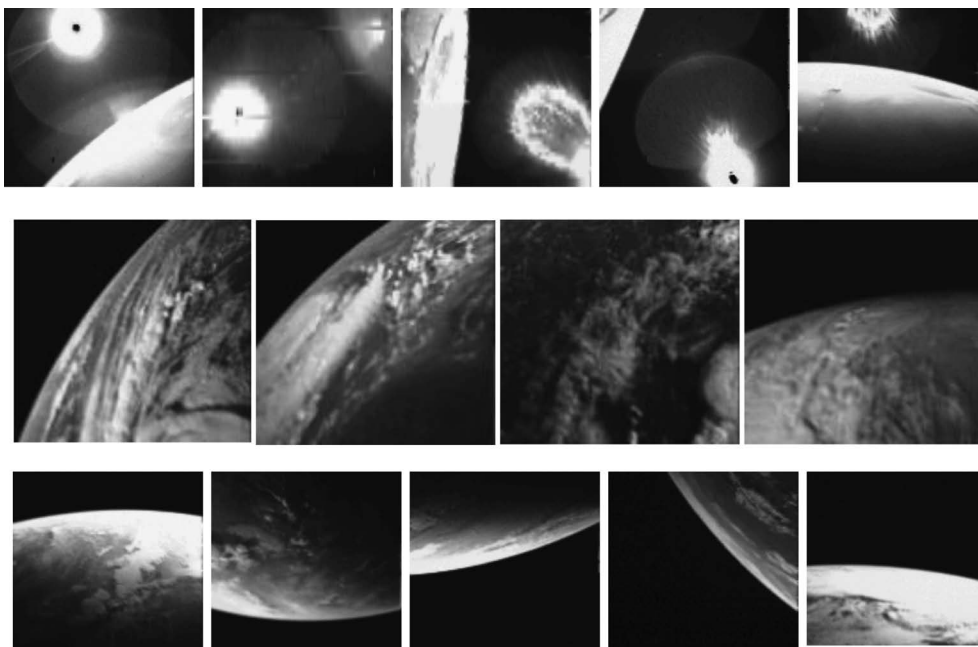


図5 CubeSatの撮影した地球画像の例(2003年～)。

指し、超小型衛星の機能・性能向上に取り組んできた。2005年には、宇宙放射線環境耐性が期待される新型太陽電池の宇宙実証のために2機目のCubeSat「XI-V」を打ち上げ、実験データの取得に成功した<sup>1)</sup>。2009年には、僅か8 kgの衛星で地上分解能20 mの地表面撮像を実現するための伸展望遠鏡機構をもった超小型衛星PRISM（愛称「ひとみ」）を打ち上げ、ミッションに成功した<sup>2)</sup>。高い姿勢制御性能が求められる宇宙科学ミッションのための30 kg程度の超小型衛星として、Nano-JASMINEの開発も行った（現在、打ち上げ待ち）。

その後は、これまでは学生中心の開発体制で工学教育も大きな目的となっていた超小型衛星を、より実用化するための試みとして、内閣府最先端研究開発支援プログラムの支援を受けて「日本発のほどよし信頼性工学を導入した超小型衛星による新しい宇宙開発・利用パラダイムの構築」プロジェクト（通称：ほどよしプロジェクト、研究代表者：東京大学・中須賀真一教授）をスタートした。ほどよしプロジェクトでは、実用レベルの性能・信頼性をもった超小型衛星を実現するために、高性能で小型の機器開発、システムティックな開発手法の構築、衛星搭載機器やソフトウェアの標準化などに取り組んだ。その中でも特に意識されたのが、あえて適切なレベルの信頼性に抑えて衛星を作るという、「ほどよし信頼性工学」の考え方であり、それにより、実用レベルの性能・信頼性を求めつつも、必要以上に高コスト・長期開発にならないような開発手法を追求した。また、本プロジェクトを通じて、50 kg級の超小型衛星搭載機器のラインアップ（計算機、電力制御装置、姿勢制御用のセンサ・アクチュエータ、イオンスラスターなど）が整備され、これらの機器を用いて設計・製造された「ほどよし3号」「ほどよし4号」の両衛星が、数mの地表分解能の地球観測画像の取得に成功し、超小型衛星が実用的なミッションを実施可能であることを実証すること

ができた<sup>3)</sup>。

東京大学以外の国内の状況としては、2003年の東京大学および東京工業大学が実現した世界初のCubeSatの打ち上げ・運用成功を皮切りに、大学の研究室を中心に超小型衛星の研究開発の流れが大きくなってきており、2003年にNPO法人として設立された大学宇宙工学コンソーシアム（University Space Engineering Consortium; UNISEC）の元で50の大学・高専が超小型衛星やロケットの研究開発を精力的に進めてきている。2015年末時点で、40機近くの超小型衛星がこれまでに打ち上げられている（図6）。

世界に目を向けると、特にここ数年で爆発的に超小型衛星の打ち上げ数が増えてきている。図7はSpaceWorks社が調べた、50 kg以内の超小型衛星のこれまでの打ち上げ数の実績と今後の打ち上げ数の予測である。2003年に世界で初めてのCubeSatが打ち上がってからかなりの時間遅れがあるものの、2013年ごろから急激に増えてきている。この増加の一端を担っているのが、多数の超小型衛星を打ち上げて協調して動作させる「コンステレーション」の構築を目指した計画である。例えば、衛星通信用の衛星を多数打ち上げて地球の全表面をカバーしようという計画があるが、このようなアプリケーションは、低コストで短期間に作ることができる超小型衛星ならではの使い方である。同様のコンステレーションを作る計画が世界中で複数立ち上がっており、超小型衛星がようやくビジネスとして花開こうとしている段階にきている。

## 深宇宙探査への挑戦

これまでの超小型衛星の実用化に向けた取り組みの次のステップは、超小型衛星の活動領域を拡大すること、すなわち、地球周回軌道を脱出し深宇宙探査することであろう。

そこで東京大学が、JAXA（宇宙航空研究開発機構）と共同で開発したのが、超小型探査機



図6 UNISECに所属する大学・高専の打ち上げた超小型衛星（2015年未現在）。

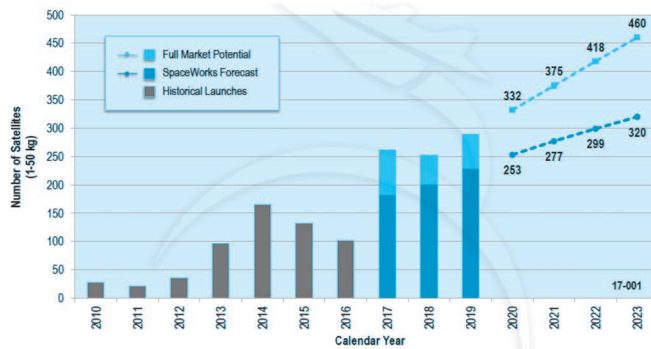


図7 50 kg以下の超小型衛星の打ち上げ数の実績と将来予測。

PROCYON（プロキオン）である。2014年12月に、小惑星探査機はやぶさ2との相乗りで打ち上げられ（図8）、世界で初めて50 kg級という非常に小さい規模で本格的な機能をもった深宇宙探査機を実現することに成功した。PROCYONのミッションは、50 kg級の超小型深宇宙探査機のバス（基本機能）を実証することを主軸としつつ、これが実現できた暁には、地球を深宇宙から遠隔で観測する科学ミッションや、より高度な探査技術

の実証（例えば、GaN（窒化ガリウム）半導体を用いた世界最高効率のX帯通信用アンプの実証など）も狙っていた。最終的には、搭載した超小型イオンスラスタを駆動し、地球の重力を利用して軌道を変更するスイングバイ技術を用いて小惑星に到達する軌道に投入し、小惑星を通過する際に至近距離から観測することまで狙っていた（図9）。PROCYONは、打ち上げに成功した後、順調にバス機能の確認を完了させ、主ミッションである

バス技術の実証に成功した。その後、小惑星への航行を目指してイオンスラスタを運転中にスラスタのトラブルにより所定の軌道への投入が困難となり小惑星への到達は断念したものの、高効率ア

ンプの実証、高精度軌道決定実験などにも成功し、50 kg級の低コスト・小型軽量の深宇宙探査手段を世界で初めて実現することに成功した<sup>4)</sup>。また、理学観測ミッションとして、地球水素コロナ（水素原子の発光現象）の撮像に世界で初めて成功したり<sup>5)</sup>（図10）、チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の水素ガスを観測し、彗星核からの水分子放出率の絶対量を決定する<sup>6)</sup>（図11）などの成果を挙げた。

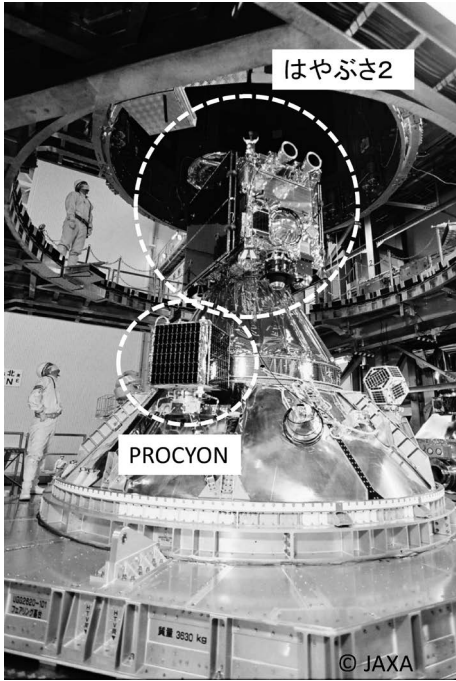


図8 はやぶさ2と相乗りで打ち上げられたPROCYON。

PROCYONの成功を受けて、さらなる挑戦として東京大学とJAXAが共同で現在取り組んでいるのが、探査機をさらに小型化し、CubeSat級の超小型探査機を実現することである。10×20×30 cmの6 U CubeSatと呼ばれる規格（1 Uは10×10×10 cmのCubeSatの基本サイズである）の非常に小さな探査機で、EQUULEUS（エクレウス）という名前の探査機を開発している（図12）。米国NASAが開発中のロケット「SLS（Space Launch System）」の初号機に2019年に相乗りして打ち上げ予定である<sup>7)</sup>。地球と月の重力が均衡するラグランジュ点と呼ばれる場所へ飛行し、そこから地球と月、および月に飛来する小天体を遠隔で観測することがEQUULEUSのミッションである。PROCYONの実現と前後して、世界では、NASA

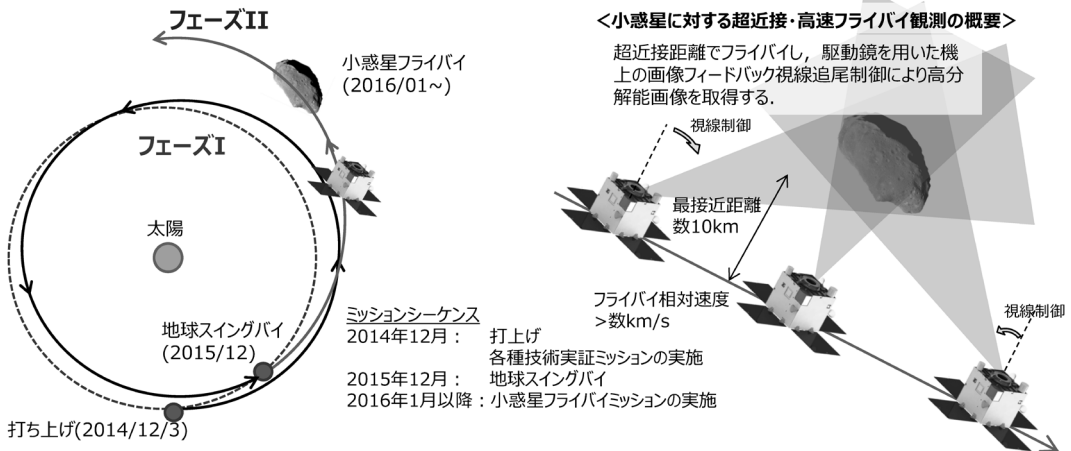


図9 PROCYONのミッションシーケンスの概要。

ジェット推進研究所 (JPL) などを中心に、CubeSat 級の深宇宙探査機の研究開発が行われてきており、日本としても PROCYON で得た優位性を活

かし、探査機の小型化の競争に参画しているところである。

### ま と め

本稿では、ここ数年で爆発的に数が増えてきている超小型衛星について、その登場の背景を紹介するとともに、日本および海外での発展の経緯について主に筆者らの研究グループの活動を中心に紹介した。超小型衛星の登場を可能にした大きな

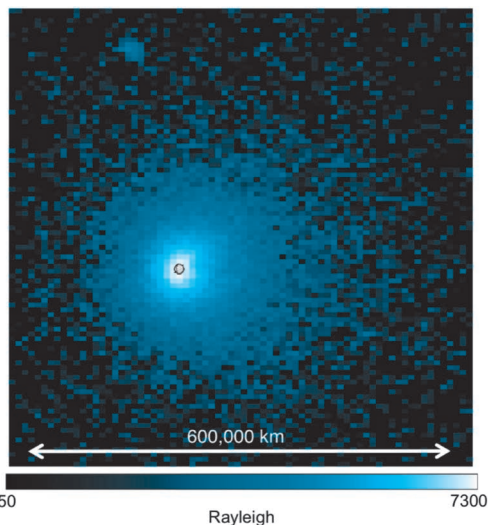


図10 2015年1月9日に PROCYON が撮像した地球水素コロナ (文献5)。中央の○が地球の位置と大きさを表す。左側が太陽方向。太陽光放射圧により水素原子が反太陽方向に伸ばされている様子が捉えられている。

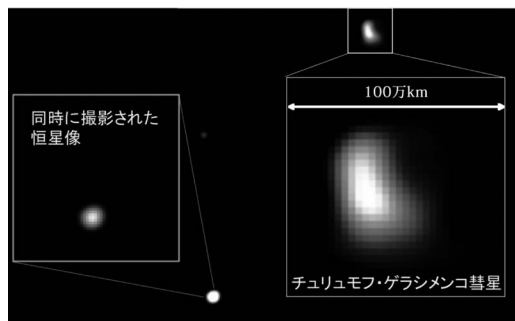


図11 PROCYON の撮影したチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星周辺の水素原子の発光分布 (右) と、同時に撮影された恒星像 (左) (立教大学提供)。

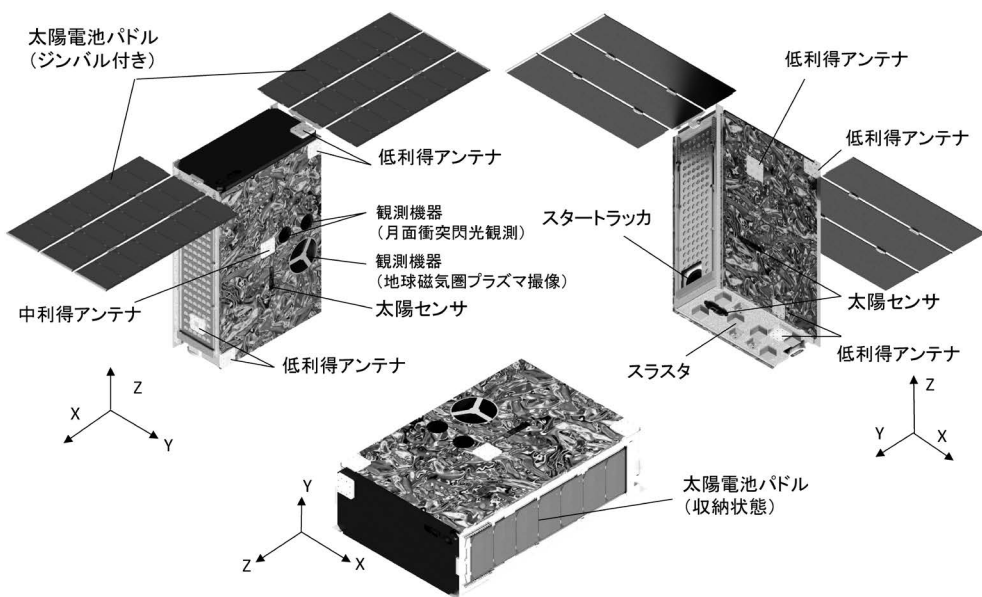


図12 超小型 CubeSat 型探査機 EQUULEUS.



要因の一つは、地上の民生品の圧倒的な小型化と、それを人工衛星に適用し宇宙環境できちんと機能させるためのシステム設計技術である。超小型衛星の登場によって、より低コストに、より高頻度に宇宙ミッションの実施が可能になりつつあり、その成果がさらに将来の挑戦的な宇宙ミッションを可能にするという好循環が起ることが今後期待される。

超小型衛星はこれまで地球周回軌道上でのミッションで爆発的な発展を遂げてきたが、超小型衛星にとっての今後のフロンティアは、地球周回軌道を脱出した深宇宙探査ミッションが一つの方向性であると筆者らは考えている。2014年に東京大学とJAXAが開発し打ち上げた超小型探査機PROCYONは、世界で初めて50kg級という非常に小さい規模で本格的な機能をもった深宇宙探査機を実現することに成功した。PROCYONの実現と前後して、世界では、さらに小さいCubeSat級の深宇宙探査機の研究開発が行われてきている。日本としてもPROCYONで得た優位性を活かし、探査機の小型化の競争に参画しているところであり、深宇宙を多数の超小型探査機が航行するような世界の実現に少しでも貢献していきたい。

### 参考文献

- 1) Funase, R., et al., 2008, Trans. Jpn. Soc. Aeronautical Space Sci., Space Technol. Jpn., 6, 1
- 2) Tanaka, T., et al., 2009, 27th Int. Symp. Space Technol. Sci. (Tsukuba, Japan), 2009-n-15
- 3) Aoyanagi, Y., et al., 2015, 30th Int. Symp. Space Technol. Sci. (Kobe, Japan), 2015-n-06
- 4) Funase, R., et al., 2016, 30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites (Utah, USA), SSC16-III-05
- 5) Kameda, S., et al., 2017, Geophysical Res. Lett., 44, 11706
- 6) Shinnaka, Y., et al., 2017, AJ, 153, 76
- 7) <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/international-partners-provide-cubesats-for-sls- maiden-flight>. (2018.5.29)

### Challenges for Deep Space Exploration by Micro/Nano Satellites

Ryu FUNASE

*Department of Aeronautics and Astronautics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan*

Abstract: The number of ultra-small satellites originating around the latter half of the 1990s has been exploding, especially with the emergence of space-related venture companies in recent years. Also, ultra-small satellites are proceeding not only to the business use in the Earth orbit but also to the world of deep space exploration where spacecraft leaves the Earth's gravity and conducts scientific observation of the solar system. In this paper, we outline the background of the appearance of micro satellite and the technology that made it possible. In addition, we will introduce our achievements of deep space exploration using ultra-small satellites so far and also express a personal opinion on the future deep space exploration by such ultra-small satellites.