

超小型衛星が拓く新しい宇宙開発・利用

東京大学 大学院工学系研究科
航空宇宙工学専攻 教授
工学博士 中須賀真一

1. 人工衛星のサイズ問題

現在の日本の宇宙開発は1トン以上の中・大型衛星が中心となっている。そのコストは数百億円、開発には5年以上の長期が必要だ。高分解能のためには大口径が必要、大電力通信のためには大型アンテナや巨大な太陽電池パドルが必要、というロジックから宿命的に衛星は巨大化してきたことは仕方ないかもしれないが、その結果、①莫大なコスト、長期開発とリスクの高さから、一般企業等が宇宙に投資できない、②打上げるからには失敗できないため新しい技術への挑戦も難しい、③サイクルが長く回数も少ないため、技術の試行回数が限られ、技術進歩・革新のスピードが遅い、などの大きな問題を生み、それが宇宙開発・利用の閉塞化を生んでいる。諸外国では、コストを一桁下げた（50億円前後の）300～600kgの「小型衛星」が現れ、宇宙後進国を相手にしたりモセン衛星の受注合戦が繰り広げられ、また、種々の地球観測・通信放送衛星の世界にも小型化の潮流が押し寄せている。日本は、経産省のASNAROでやっとこ

の小型衛星の世界に乗り出したが、後発ゆえの苦戦を強いられている。もっと小さな衛星で勝負できないだろうかというのが我々の発想である。

2. 東京大学における超小型衛星への挑戦

我々東京大学では、1999年頃より、さらに小さな50kg以下の超小型衛星の研究開発活動が続いている。もともとの発想は「教育」、つまり、超小型衛星を題材に、短期間で宇宙開発の一通りのサイクルを経験させることにより、宇宙工学、もの作り、プロジェクトマネジメントなどの教育を提供しようというものであった。まず、1999年よりアメリカと共同で、CanSatと呼ばれる350ml缶サイズの超小型衛星モデルをロケットで打上げて落下中に実験を行うプロジェクトを進め、その経験と知見をもとに2000年からCubeSatと呼ばれる10cm立方、1kg（世界最小）の衛星の開発を開始した。2003年6月には、ロシアのロケットROCKOTで、東工大の衛星とともに、世界初の1kg衛星の打上げ運用に成功した。上記



図1 教育用衛星としての東京大学のCANSATおよびCubeSatの1号機XI-IV

の教育効果は絶大であり、東大・東工大の成功に刺激を受けた多くの日本の大学・高専で超小型衛星開発が開始され、今や大きなブームとなりつつある。

3. 超小型衛星の教育・人材育成への貢献

超小型衛星は教育・人材育成に画期的な機会を提供してくれている。1年から2年程度の短期間で宇宙プロジェクトの1サイクル、つまり、アイデアの創出から衛星の基本アイデアの検討、設計、製作、地上試験、その成果のフィードバック、打上げ、運用、結果解析のすべてを経験させることで、たとえば、それぞれの段階で何に気をつけないといけないか、を体感させることができる。いいかげんな設計や製作、試験は必ずあとになってしっぺがえしが来るのである。また、工学においては、実際に設計し製作したものが、現実の環境の中でどのように動作するかを確認し、その結果を考察して初めて教育が完了する。紙の上の設計を教官が採点するだけでは、学生も納得しないし、本当の意味での「評価」にはならない。現実からの厳しいフィードバックこそが最高の教官である。設計図の上では、常に物は「動くはず」である。しかし、現実はなかなか計算通りにはいかない。その厳しさを知って次に反映することが大事である。失敗するとものごく悔しい、だから今度は絶対失敗しないぞ、という思いが学生を成長させ、技術を発展させるのである。失敗は小さなプロジェクトのうちにたくさん経験しておくべきである。何百億円もかかる大きなプロジェクトでは、「失敗した、でも勉強になった」、という甘えは許されないからである。

もう一つ大事な教育は、宇宙開発にとって極めて重要な資質であるプロジェクトマネジメント力やチームワークの素養の実践的な鍛錬である。学生は試行錯誤しながら、お金・人・

時間の管理の仕方、効果的なミーティングの仕方、ドキュメントの残し方・利用の仕方を学んでいく。講義で「こうやるべきだ」と教えるだけでは身につかない。実践が何よりも大事である。プロジェクト進行を通して、そのような能力が明らかに高くなっていくのが目に見えるのである。

4. 最初のトレーニングであるCanSat計画

CanSat計画はStanford大学Twiggs教授により1998年の大学宇宙システムシンポジウム(USSS: University Space Systems Symposium)で提案されたプログラムである。各大学が350mlのジュース缶の大きさの衛星を作り(図1左)、アマチュアロケットグループの提供する固体ロケットを使って、高度約4kmまで打上げる計画(ARLISS: A Rocket Launch for International Student Satellites)がスタートし、1999年以降毎年、アメリカ・ネバダ州のBlack Rock砂漠での打上げ実験が行われてきた。当初日本からは東大、東工大だけの参加であったが、2010年には12大学、1高校が参加し、ロケット40本以上を打上げる大きな実験となっている。日米の大学だけでなく韓国・ヨーロッパからの参加も見られるなど、国際化も進んでいる。

CanSatは約4kmの高度でロケットから放出されると、パラシュートを開き、地面に到達するまでの約15~20分間に、衛星・地上局間の通信実験、軌道上に上げる前段階の衛星機器の実証実験などを行う。大学ごとに趣向を凝らした実験、たとえば、カメラの方向を決めて画像取得する実験、複数機によるフォーメーションフライトの実験、テザー実験などが実施され、各大学の得意とする分野で衛星技術を高める努力がなされてきた。また、2001年からは、放出されたCanSatが目標地点に如何に正確に自律的に帰還できるかを競う

Comeback Competitionが開かれ、さらに学生のモチベーションは上がった。これまでのベスト・リザルトはFly-backタイプ（パラフォイルなどを制御して飛行して戻る）は45m、ローバタイプ（着地した後、車輪などで地面の上を走行して戻る）は、何と2008年に目標点に到達（0m）するという快挙をなしとげた。多くの大学がこのコンペをはじめCanSatで衛星の技術力やプロジェクトマネジメント力を磨いてきたことはいままでのない。

5. 初めての軌道上衛星CubeSat計画

次のステップは軌道上衛星の開発であった。CubeSatは、10cm立方、1kg以下の標準サイズの超小型衛星プロジェクトである。教育が第一目的であるが、1~1.5年という極めて短期・低コストで開発できることから、新規技術の迅速な宇宙実証、宇宙ビジネスの舞台として、新しい宇宙開発を切り開く可能性も有望視されている。現在、世界で100以上の大学、NASAなどの宇宙機関が独自のプロジェクトを進めているが、東京大学・東京工業大学はいち早く完成させ、2003年6月の打上げは、CubeSatの中でも最も早い打上げとなった。当時の世界最小の人工衛星である。

東京大学のCubeSatの1号機はXI（サイ：X-factor Investigator）-IV（フォー）と呼ばれ、上記のような宇宙工学教育と超小型衛星バス技術の軌道上実証を大きな目的としている（図1右）。特に太陽電池以外はすべて民生品を使用しており、その軌道上での動作を確認し、今後の超小型衛星開発への土台を作ることが重要なミッションである。また、東京大学では、超小型衛星のなしうる効果的なミッションとしてリモートセンシングを考えており、その第一歩として、小型CMOSカメラによる地球の撮像とダウンリンクの機能も搭載した。2003年6月のロシアのロケットでの打

上げ後、すべての軌道上実験を着実にこなし、300枚を超える地球の写真を地上に届けてくれた。その画像を、メールアドレスを登録してくれたユーザーに配信する「さいメールステーション」という無料のサービスも学生の発案で実施しており、3000名を超えるユーザーから喜ばれている。小さな衛星ならではのアウトリーチであろう。<http://www.space.t.u-tokyo.ac.jp>参照

東大CubeSatの2号機はXI-V（サイ・ファイブ）と呼ばれ、2005年にやはりロシアのロケットで打上げられたが、この衛星には当時JAXAが開発した放射線に強い新しい太陽電池を搭載し、軌道上で実験・実証している。新しく開発された技術を迅速に実証するのに、頻繁に上がる超小型衛星を利用することは、「技術を旬なうちに軌道上で実証する」上で非常に効果的なのである。この太陽電池の軌道上実験は極めてうまくいっており、放射線で劣化しないという有用な軌道上データが蓄積されている。

6. 実用衛星への最初の試み：「PRISM」と「Nano-JASMINE」

こうしたCubeSat開発にて得られた知見を基に、東京大学では2002年によりより実用的なりモートセンシング（地球観測）機能を有する超小型衛星の開発プロジェクトに着手した。“Pico-satellite for Remote-sensing and Innovative Space Missions”の頭文字から「PRISM」と名づけられたこのプロジェクトでは、大学で開発可能なサイズで、どこまで高い地上分解能を実現できるかに挑戦した。中・大型衛星が利用する反射光学系ではなく、柔軟部材を用いた軽量・コンパクトな屈折式光学系の研究開発を行い、目標地表分解能は概念検討の結果30mと設定した。このメインミッション達成のために、高性能な光学系の

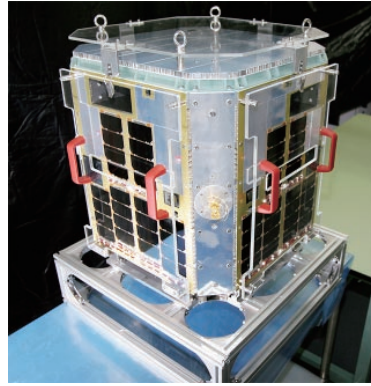
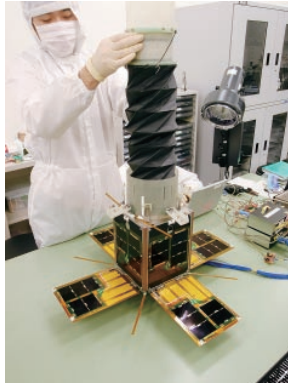


図2 実用衛星を目指したPRISM（左）とNano-JASMINE（右）

みならず、磁気トルカやサンセンサを用いた高精度姿勢制御や高い通信容量を実現するGMSK変調方式送信機の搭載、CANバスラインで接続された複数のCPUによるマルチプロセッサ構造など、多くの新規技術の開発も行った。

PRISMは、2009年1月、JAXAのH-II Aのピギーバック（GOSATの相乗り）で軌道に打上げられ、その後、順調に姿勢制御による回転運動の除去、伸展ブームの展開、光学系パラメータのチューニングを実施し、雲や地上のリモートセンシング画像の取得に成功している。画像解析の結果、30mの地上分解能が獲得できたことも実証された。現在も引き続き光学系のチューニングと姿勢制御実験を継続している。

現在は、さらに高機能の天文観測衛星Nano-JASMINEを国立天文台と開発中である。1980年代に500億円以上をかけて欧州が作った1.4トン衛星ヒッパルカスとほぼ同じ機能を、約30kg、コストも数百分の一の衛星で実現しようという途方もないチャレンジである。さまざまな技術課題を解決し、2011年夏以降のブラジルでの打上げを目指して、実際に打上げるフライトモデルの製作がほぼ完了（2011年7月現在）。世界のトップサイエンスを目指す学生の格闘は続いている。

7. 超小型衛星による新しい宇宙利用の開拓と産業化への挑戦

超小型衛星において、教育を超えたもうひとつの重要な目的は、これまでの莫大なコストと長い開発期間にかかる宇宙開発・利用に見られる高い「しきい」を徹底的に下げ、新しい宇宙利用の道とプレーヤーを呼び込むことである。現在の高コストの衛星では、利用者はほとんど国ばかりで、その利用法も通信・放送・測位・地球観測・宇宙科学など、非常に限定的であり、まだまだ宇宙の潜在的能力を十分に活用しているとはいえない。その結果、産業化も進んでいない。超小型衛星の大きな特徴は、コストが中・大型衛星の1機数百億円に対し、1機1～2億円、開発期間も通常の4～5年に対し、1～2年ほどと極端に「安く、早い」こと。もちろん中・大型衛星と同じレベルの機能（たとえば同じ分解能）は期待できないが、この「しきい」の爆発的な低下が新しい利用法を生むのである。

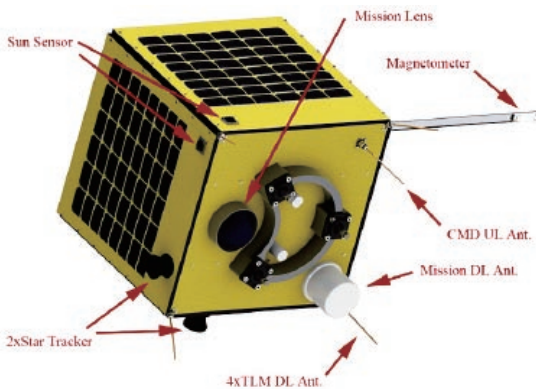
低コスト・超軽量の衛星を多数機打上げ軌道に適切に配置することで、中・大型衛星でも一機では実現できない同一地域の高頻度の観測やステレオ視等の特長ある観測方法を実現できる。また、費用と開発期間の「しきい」が根本的にさがることにより、従来、宇宙に全く見向きをしなかった個人・大学・研究機

関・企業・自治体等から新しい利用プレーヤー・利用法を生み、「マイ衛星」「パーソナル衛星」のコンセプトが生まれる。低コストかつ5m程度の分解能で細かく必要な場所の地上撮影ができることで、GIS、測量、航路の安全監視等の分野で新規ユーザを拡大したり、自分専用の観測器を持った宇宙科学研究者の研究を躍進させたり、教育衛星が子供たちの理科・社会教育をより身近で楽しいものに変化させたりするだろう。まさに、メインフレームからパソコンへのダウン・サイジング・コスト破壊やインターネット普及が、ユーザの爆発的広がりや新しい利用法の創生をもたらしたコンピュータの歴史を衛星の世界で再現しようというわけである。

8. 最先端研究開発支援プログラムで世界の超小型衛星大国に

2010年には著者は内閣府の最先端研究開発支援プログラムからの研究資金を得て、「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」というテーマでの超小型衛星の

研究・開発・利用コミュニティを構築する活動をスタートさせた。ここでは、①超小型衛星に適合した信頼性の概念を「ほどよし信頼性工学」という名前で理論体系化する、②要素技術を世界トップレベルに開発し国内に超小型衛星用機器のプールを作る、③超小型衛星用試験方法をはじめ開発プロセスを刷新して短工期を目指す、④以上を統合して実施するオールジャパンの大学・中小企業を巻き込んだ組織作りを実施する、という4つの目標を掲げている。4年と1ヵ月の期間の中で、上記の各テーマでの研究開発を進めるとともに、それを実証する場と利用を開拓する呼び水として5機の超小型衛星の開発・打上げをする予定である。図3はそのうちの1号機の概念図で、5m分解能のリモートセンシング衛星としてその取得データを公開し、リモセンデータの利用実験を自由に企業や大学にさせていただくという計画である。この最先端プログラムに興味をもたれる方が、利用面や、あるいは衛星技術面で参画されんことを期待している。



Size	50 [cm-cubic]
Weight	50 [kg]
OBC	FPGA
Communication	UHF, X (max 20 Mbps)
Mission life	2 [year]
Attitude control	3-axis stabilization with STT, SAS, Magnetometer Gyros, RW, Magnet torquers
- stability	0.1 deg/sec
- pointing accuracy	5 arcmin
- determination	10 arcsec
Optical sensor:	15kg, 5m GSD (500km alt.)
- Focal length	740mm (F# 7)
- IFOV	24.3 x 16.2 km (500km alt.)
- Bands (SNR)	B (103), G (119), R (84), NIR (63)
- Onboard storage	8GB (~100 images)

図3 ほどよし1号の外観とスペック

『本文は、本年7月12日に開催されたSJAC第66回宇宙委員会で講演した内容をまとめたものです。』