

超小型衛星事始め

東京大学 大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻 中須賀 真一

1. はじめに

近年、いくつかの日本の大学では超小型人工衛星を題材に、「物作り」を基本とした学生の実践的な宇宙工学教育プロジェクトを進めてきた。1999年から始まったCanSatと呼ばれるジュース缶サイズの衛星プロジェクトで力をつけた東大、東工大、日大をはじめとする多くの大学が、CubeSat(10cm立方1kgの超小型衛星)計画に乗り出し、2003年には世界に先駆けて東大、東工大のCubeSatが宇宙に打ち上げられ、超小型衛星戦国時代の幕が切って落とされた。その後は、CubeSatを開発する大学や、東大、東工大、東北大のようにより実用的なりモートセンシング、あるいは宇宙科学ミッションを目指す大学も現れ、今や15を超える日本の大学・高専が超小型衛星開発を競い、すでに16機の大学・高専衛星が打ち上げられた。2010年からはオールジャパンの超小型衛星研究開発計画、通称「ほどよし衛星プロジェクト」が筆者をリーダーとしてスタートし、世界一の超小型衛星大国を目指した研究開発や利用開拓が進められている。本稿では、このような日本、特に東大における超小型衛星開発の歴史を振り返り、その意義や将来のビジョンをまとめたい。

2. 超小型衛星の教育的意義

小型衛星は宇宙工学教育に画期的な機会を提供してくれている。1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、打ち上げ、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。

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。

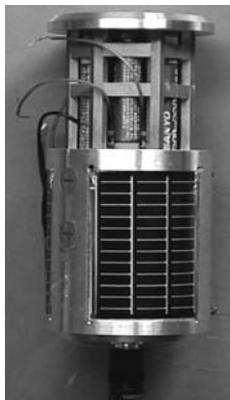
講義で「こうやるべきだ」と教えるだけでは身につかない。実践が何よりも大事である。プロジェクト進行を通して、そのような能力が明らかに高くなっていくのが目に見えるのである。

しかし、従来の宇宙工学の分野では、ロボットや計算機の世界とは異なり、衛星やロケットの莫大なコストや開発期間の長さ、打ち上げ機会の獲得の難しさから、そのような実践的な教育ができなかった。宇宙では「ロボコン」はなかなかできないのである。それを可能にしたのが超小型衛星の世界であり、その背景となるのが近年のエレクトロニクスの小型・高機能化・小消費電力化・耐久性の向上である。東京の秋葉原の電気店街（東大からは自転車の距離！）で購入した部品でも、工夫して使用すれば、そして貧乏な大学の持つ資金・狭い施設の中でも超小型衛星は作れるのである。

日本の多くの大学では、1993年から始まった「衛星設計コンテスト」（日本航空宇宙学会など3学会等主催）で衛星設計の力を蓄積してきたが、それはあくまで机上の設計までであり、実際の物作りにはいたらなかった。しかし、次に述べるCanSat計画が、物作りへの学生の情熱を一気に解放させたといえる。

3. CanSat計画

CanSat計画はStanford大学Twiggs教授により提案された教育プログラムである。350mlのジュース缶の大きさの衛星を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4 kmまで打ち上げるプログラム（ARLISS: A Rocket Launch for International Student Satellites）が、1999年9月11日、アメリカ・ネバダ州のBlack Rock砂漠でスタートした。日本からは東大、東工大、アメリカからはアリゾナ州立大等が参加した。以降毎年1回行われるARLISSには、年々より多くの大学が参加し、2010年に



←'99 1号機
（ホイールによる回転、糸のニクロム線による切断、太陽電池、二次電池、ダウンリンク、CPU、メモリ実験）



←'99 2号機
（ジャイロ・加速度計・気圧計・温度計等センサー群、アップリンク・ダウンリンク、メモリ、CPU等実験）



↑'99 3号機
（CCDカメラによる画像取得と地上へのリアルタイム伝送実験）
図1 1999年(初年度)東京大学CanSatの3機

は日本から13大学、アメリカから2大学、韓国、フランスなどからの参加もあり、また「CANSAT甲子園」という国内大会を勝ち抜いた高校生チームも参加する大きな大会になっている。図1に1999年の東大CanSat 3機を載せる。CanSatは約4 kmの高度（ARLISSの場合）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分の間に、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。衛星の基本機能（通信、センシング、姿勢制御など）の実証がメインであるが、それ以外に、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ようという意図が見られてきた。また、国内でも係留気球で高度100-200m程度まで持ち上げ落下させる実験や、モデルロケットで500m程度まで打ち上げて落とす実験も行われ、日本は、世界で最も進んだCANSAT先進国としての地位を保っている。2010年からは海外の教師にCANSAT教育を施すプログラムCLTP（CANSAT Leaders Training Program）もスタートした。

また、2001年からは、ロケットから放出されたCanSatがGPSとパラフォイルの能力で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、技術レベルは相当に向上してきた。これは、GPS等による航法、オンボードコンピュータによる誘導計算、そして舵を切るアクチュエータによる制御のループがすべて完全に機能しないとよい成果がでない高度な実験であり、また、できのよし悪しが数値に如実に現れるので学生のモチベーションは大いに高まり、パラフォイルタイプ、ローバタイプ、固定翼タイプなど、さまざまな趣向を凝らしたCanSatが作られてきた。Comebackコンペティションは、国内でも能代宇宙イベントなどで毎年実施され、多くの大学にとって非常にポピュラーな「ロボコン」となっている。これらのコンペは大学・高専のコミュニティUNISECが運営している。（詳細はUNISECホームページ <http://www.unisec.jp> 参照）

4. CubeSat計画

4.1 東大CubeSatの概要

次のステップは軌道上衛星の開発であった。そこで現れたのがCubeSatの概念である。CubeSatは、スタンフォード大学のTwiggs教授より提案された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。前述の教育目的だけでなく、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、宇宙機関、ベンチャー会社等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月の打ち上げは、CubeSatの中でも最も早い打ち上げとなった。

東京大学のCubeSatはXI（サイ：X-factor Investigator 図2参照）シリーズと名付けられ、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。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。小型CMOSカメラによる地球の撮像とダウンリンクもアドバンスドミッション（仮に成功しなくてもよい挑戦的ミッション）として搭載した。

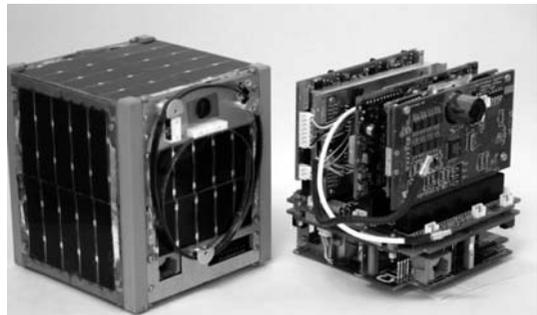


図2 東京大学 XI-IV(左：外観，右：内部構造)

4.2 XI-IVの仕様とミッション

XI-IVのスペックを表1に載せる。太陽電池は宇宙仕様のSHARP製の効率16%の単結晶シリコンを使っている。姿勢制御は、当初は能動制御も検討したが、10cm立方の衛星に制御系を搭載することは現段階では困難であると判断し、永久磁石を搭載してそれが地磁気の方角を向くことを狙った受動制御とした。そのため、太陽電池も翼にはせず、ボディーマウント（本体の側面に張るタイプ）にした。

補足すると、EEPROM、PICともCubeSat以前に実施した缶サイズ衛星CanSat実験で頻繁に利用しており、それを流用した。放射線耐性に関しては、ミッション期間が短いことからトータルドーズの効果はほとんど影響無しと判断し、強烈な放射線でビット反転やラッチアップ（ショート）が起こる現象であるSEUやSELだけの耐性をつけることとした。具体的には、電源系を3系統とし、それぞれが異なるCPU（メインCPU、送信機制御CPU、受信機制御CPU）に給電するようにし、どの系統が故障しても最低の情報がダウンリンクされるように工夫するとともに、3系統がそれぞれに他の系統の電流を監視し、過電流を検知するとリセットをかける相互監視機能を実装した。「システムとして強くする」概念が重要である。実際は、打ち上げ後8年たったが、CPUであるPICは一回も放射線現象（SEL,SEU）が起こらず、耐性が非常に高いことが証明された。

送受信機は今回のために1200bps送受信機を民間のメーカー（西無線）と共同開発した。帯域がアマチュア帯なので市販のアマチュア無線用地上局装置がすべて利用でき、また、衛星軌道推定やダウンリンクデータの取得などで多くのアマチュア無線家の協力を仰げることは大きなメリットである。新規開発した無線機は、今は西無線のアマチュア送受信機の名で広く使われている。

サイズ	10×10×10cm ³
質量	1kg
C&DH系 OBC 記憶装置	PIC16LF877, 8bit, 4MHz EEPROM 256kbyte
通信系 上り回線 下りテレメ回線 下りビーコン回線 アンテナ	144MHz帯, FM, 1200bps 430MHz帯, FM, 1200bps, 0.8W 430MHz帯, CW, 80mW モノポール（上り） ダイポール（下り）
電源系 太陽電池 二次電池	単結晶シリコン, 1.1W（平均） リチウムイオン電池, 6.2AH
姿勢制御	パッシブ沿磁力線制御
センサー	温度, 電圧, 電流, CMOSカメラ

表1 XI-IVのスペック

釣り糸によるローンチロックとニクロム線による切断システムは小型衛星の分野ではよく利用されており、簡便で衝撃もなく比較的信頼度も高い。アンテナの保持・展開や分離機構の蓋の展開に利用した。

4.3 XI-IVの開発の経緯と打ち上げ運用

XIシリーズは2000年の9月に概念検討をスタートし、2002年初頭から2機のBBM（XI-IおよびXI-II）、2機のEM（XI-III）を製作した後、2002年8月よりフライトモデル2機（XI-IVおよびXI-V）の製作に入った。XI-IVが宇宙に打ち上げられた1号機である。この間、環境試験としては、東大での真空試験、高崎原子力研究所およびNASDAでの放射線試験、宇宙科学研究所の施設での熱真空試験と振動試験、都立航空高専の電波暗室での電波試験などの、通常必要とされる環境試験をほぼすべて実施した。通信機は新たに開発したので、電波暗室での試験だけでなく実環境下での長距離通信実験をしたかったため、宇宙科学研究所の気球を利用して三陸沖、高度40kmから東大局までの500km直達通信実験を実施して検証した。

2003年6月30日午後11:15（日本時間）XI-IVは、ロシアのプレセックよりEUROCKOT社の提供する3段ロケットRockotにより8機の相

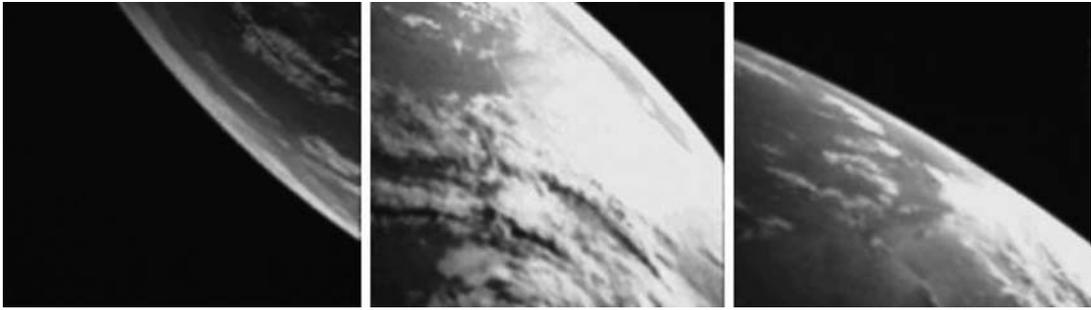


図3 CubeSat-XIが撮影した地球画像例

乗り打ち上げの1機として東工大のCUTE-1とともに打ち上げられた。打ち上げ後の初期運用を終え、ほぼ2か月ほどで、予定していた実験（アマチュア通信実験など）をすべて完了し、その後は、搭載したカメラで地球の画像を撮像する作業を繰り返した。図3にこれまでに取得した画像の一例を乗せる。2011年7月現在、8年を超えて健康に動作し続けている。

CubeSatを一般の方々に知ってもらい、宇宙アウトリーチ活動にも貢献しようという目的で、撮影された画像をメールでPCないし携帯電話に配信するサービスを企画し、現在は3000名を超える登録をいただき、一般の方からの応援メッセージを得るなど、アウトリーチ活動も行っている。

<http://www.space.t.u-tokyo.ac.jp/ximail/>

5. その後の東京大学の超小型衛星プロジェクト

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ち上げられたが、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、頻りに打ちあがる超小型衛星を利用することは、「技術を匂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順調で、放射線で劣化しない特性がデータに如実

に表れ、太陽電池の開発者から喜ばれている。

また、2002年には、より実的なりリモートセンシング（地球観測）衛星PRISM計画をスタートした。ここでは、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・コンパクトな伸展型の屈折式光学系の新規開発を行い、30mの地表分解能を目指した。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（図4上）は2009年1月、JAXAのH-IIAのピギーバック（いぶきの相乗り）で軌道上に打ち上げられ、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300億円以上をかけて欧州が作った1.2トン衛星ヒッパルカスとほぼ同じ機能を、約33kg、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～12年のブラジルでの打ち上げを目指して、実際に打ち上げるフ

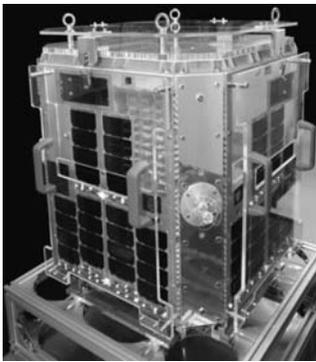
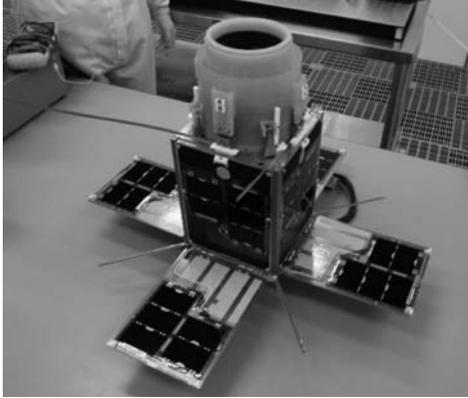


図4 PRISM(上)とNano-JASMINE(下)

ライトモデルがほぼ完成した(図4下)。

6. 超小型衛星が拓く未来

超小型衛星の教育を超えた目的は、これまでの莫大なコストと長い開発期間のかかる宇宙開発・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。その大きな特徴は、コストが中・大型衛星の1機数百億円に対し、1機2～3億円、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ち上げ軌道上に適切に配置することで、中・大型衛星で

も1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、宇宙に全く見向きもしなかった個人・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。

このような目標を実現すべく、2010年、内閣府からの大型資金による超小型衛星の研究プログラム「ほどよし衛星プロジェクト」がスタートした。ここでは、大学・中小企業の連携によるオールジャパン体制で、超小型衛星のアーキテクチャや製造・試験プロセスの研究・機器開発・衛星開発・販売促進・利用・人材育成までを統合して実施することにより、日本が世界一の超小型衛星大国になることを目指している。「しきい」が根本的にさがったところで、多くの人の「宇宙で何かをしたい」願望が解放され、さまざまな「おれ流」のミッションが生まれる社会、それを通して宇宙が真に我々の生活の豊かさに貢献する社会、そんな宇宙開発利用像を目指して、我々の挑戦は続いている。