

大学における超小型衛星の研究開発と宇宙利用

中須賀真一（東京大学 大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻）

1. はじめに

近年、いくつかの日本の大学では人工衛星を題材に、「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。東大、東工大、九大、日大、東北大、創価大などは、1999年より、CanSatと呼ばれる超小型衛星をロケットで高度4kmまで打ち上げて落下中に実験を行うプログラムをアメリカと共同で進めてきた。そこで得られた経験と技術をベースに、軌道上衛星をめざした教育的・工学的プロジェクトである CubeSat（10cm立方1kgの超小型衛星）計画がいくつかの大学で進行中で、大学学生の手作り衛星による宇宙開発への参画は今や一つの大きな潮流となりつつある。2003年6月に東大・東工大の2機の CubeSat が打ち上げられ、1年半を超えて運用が続けられていることは、大学学生の手で衛星を作れることを示したうえで、大きなマイルストーンであったと考える。これ以外にも、千葉工大の鯨生態観測衛星(2002年12月打ち上げ成功)や QPS 計画(九大)、農業用リモートセンシング衛星計画(北海道工大)など、多くの衛星プロジェクトが生まれ、国際協力、中小企業との産学連携の中で積極的・自律的に学生の手により衛星の製作や打ち上げ機会の探索が行われている。これらの活動は、教育的成果が極めて大きいだけでなく、大学が自前で衛星の製作・打ち上げを行う能力を持つことで、ややもすれば狭い世界になりがちな宇宙開発のすそ野をひろげ、広い分野の研究者の参加による革新的なミッション・アイデアと衛星技術の発掘、国研やメーカーの先進的技術の迅速な実証機会の提供などの効果ももたらすと思われ、現在、閉塞感のある日本の宇宙開発全体に大きな刺激を与えることが期待される。

ここでは、まずは大学衛星の教育的意義を述べ、ついで、日本の大学衛星の活性化に大きな貢献を果たした CanSat 計画の概要とそこで獲得してきた技術・教訓を紹介し、ついで東京大学の CubeSat について詳説する。最後に、このような小型衛星プロジェクトが宇宙開発にもたらす効果について、欧米の例を参考に議論したい。

2. 大学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。設計図の上では、常に

物は「動くはず」である。しかし、世の中はそう甘くない。その厳しさを知って次に反映することが大事である。失敗するともものすごく悔しい、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たくさん経験しておくべきであろう。何百億円もかかる大きなプロジェクトでは失敗ではできないため、そのような勉強の機会是与えられるべくもない。

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・施設の中でも小型衛星は作れるのである。

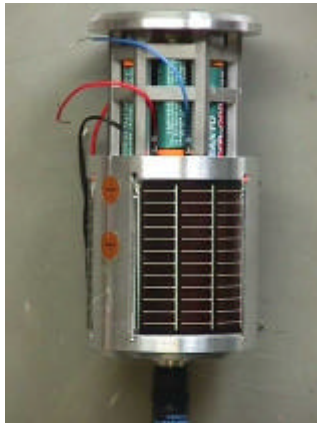
日本の多くの大学では、1993年から始まった「衛星設計コンテスト」(日本航空宇宙学会など3学会等主催)で衛星設計の力を蓄積してきたが、それはあくまで机上の設計までであり、実際の物作りにはいたらなかった。しかし、次に述べる CanSat 計画が、物作りへの学生の情熱を一気に解放させたといえる。

3 . CanSat 計画

CanSat 計画は Stanford 大学 Twiggs 教授により 1998 年の大学宇宙システムシンポジウム(USSS: University Space Systems Symposium, Hawaii, 1998 年 11 月)で提案されたプログラムである。各大学が 350 ml のジュース缶の大きさの衛星を作り、それを一挙に軌道上に打ち上げるのが当初の計画であったが、軌道上への打ち上げ手段の確保がむずかしいことから、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 まで打ち上げる計画 (ARLISS:A Rocket Launch for International Student Satellites) へと変更になり、1999 年 9 月 11 日、アメリカ・ネバダ州の Black Rock 砂漠での打ち上げが行われた。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、各大学が 1 機のロケットに 3 個の CANSAT を搭載して実験を行った。その後、毎年実験は行われ、2004 年 9 月には日本から 5 大学、アメリカから 3 大学・高校が参加する大きな実験になっている。図 1 に 1999 年の東大 CanSat 3 機を、図 2 に 2000 年の東大 CanSat 2 機をのせる。

CanSat は約 4 km 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い、大きな成果を得ることができた。衛星の基本機能（通信、センシング、姿勢制御など）の実証実験がメインであるが、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。



'99 1 号機
 (ホイールによる回転、糸のこみ線による切断、太陽電池、二次電池、ダウリンク、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、アプリケーション・ダウリンク、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



図2 2000年の東京大学の CanSat (左：DGPS 実験用 右：起き上がり実験)

また、2001年からは、ロケットから放出された CanSat が GPS とパラフォイルを利用して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、そしてパラフォイルの紐を引く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、できの良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、さまざまな趣向を凝らした CanSat が作られてきた。図3に一例を挙げるが、これは、アメリカでの2002年の大会で45m(これまでの最高記録)という記録で優勝した CanSat である。Comeback コンペティションは2002年10月26日に群馬県で第一回国内コンペを開催するに至っている。現在は UNISEC(後述)の主催で開催されているが、今後、多くの大学・高専・高校などの参加を期待するとともに、アメリカ以外の国からも参加を求めて国際大会にしたいと考えている。(詳細は UNISEC ホームページ <http://www.unisec.jp> 参照)



図3 2002年 ComeBack コンペに参加した CanSat

我々の研究室では、これまでの CanSat 計画で、超小型衛星バスシステムの設計・製作・試験技術を獲得してきた。特に、マイクロチップを用いた搭載計算機、EEPROM によるオンボードストレージ、TNC(Terminal Node Controller)と超小型送信・受信機、ジャイロ、加速度計、温度計等のセンサー、モーター等のアクチュエータ、太陽電池とバッテリー等の要素技術については大きな実績を得たと考えている。また、サブオービタルといえども打上げ時のランダム振動、静的荷重は実際のロケットに匹敵するものであり、その環境に耐えて動作したことは、大きな自信となった。また、そのための環境試験として行った振動試験では、いくつかの不具合が見つかって補修ができ、事前の試験の有効性と試験方法に関する多くの知見を得ることができた。

CANSAT 計画は教育目的を第一にかかげた国際協力プロジェクトである。上記の技術面での習熟のみならず、学生に対する教育的な成果も予想以上に大きかったと言える。なかでも、現実の環境下で動作するものを作る難しさ、特に、いいかげんな設計・製作・試験は必ず後になってしっぺ返しを食うことを経験した。小さなプロジェクトであっても、効果的なミーティング、チームワーク、ドキュメンテーションの取り方などを試行錯誤的に模索し、プロジェクトマネジメントの観点でも貴重な経験を得た。国際協力の点でも、インターフェース調整のむずかしさと重要性を実感でき、教育的効果は予想以上に大であった。

大事なことは「打ち上げ実験をする」ということである。宇宙が好きな学生である。「打

ち上げる」ことがものすごい情熱をうみ、寝る間も惜しんで衛星を作るのである。モチベーションを与えることの大事さを痛感した。

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。学生が衛星開発のすべてのプロセスを経験し、さらに打ち上げて実際の世界での挙動を知ることにより、実践的な宇宙工学教育を施すことができ、また、プロジェクトマネジメントの面でも極めて有効な教育手段として提案された。また、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 60 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 CubeSat XI(サイ : X-factor Investigator、図 4 参照)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。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もアドバンスドミッションとして搭載した。

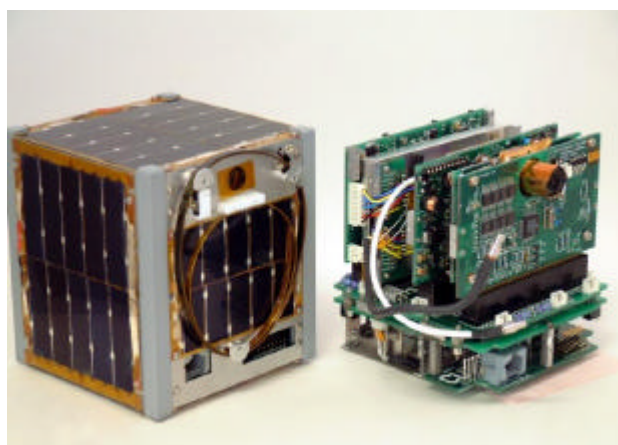


図 4 東京大学 CubeSat-XI (左 : 外観、右 : 内部構造)

4.2 CubeSat-XI の仕様とミッション

CubeSat-XI のスペックを表 1 に載せる。サイズ・重量は公表された衛星の中では世界最小である。通信に使用するのはアマチュア無線周波数帯である。モールスピーコンを 430MHz 帯で送信するほか、テレメトリダウンリンクを 430MHz 帯、コマンドアップリン

クを 144MHz 帯で行う。ビーコン及びダウンリンクのフォーマットは、公開して全世界のアマチュア無線家の皆さんに受信の協力をしていただいている。太陽電池は宇宙仕様の効率 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、ポディーマウントにした。これらの判断には、これまでの 50kg 以下の小型衛星の世界では、三軸制御 + 太陽電池パドル方式の衛星は三軸制御系の不調で十分な太陽発電ができず失敗に終わることが多かったという他国の経験も反映している。

表 1 CubeSat-XI のスペック

サイズ	10cm × 10cm × 10cm
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

具体的な実験項目は以下のようなものである。

- ・ 低コスト、低電力の民生 CPU を用いた OBC の宇宙実証
- ・ SEL/SEU 防御回路の宇宙実証
- ・ 民生部品のみによる冗長性の確保
- ・ 開発した超小型アマチュア無線帯送受信機およびビーコンシステム
- ・ リチウムイオン充電電池充電回路
- ・ 15000 ピクセル 16 ビットカラー CMOS カメラおよびオンボード画像評価機能
- ・ 民生品主体の地上局設備の設営・運用

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、その技術 Heritage である。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、SEL および SEU だけの耐性をつけることを検討した。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。

送受信機は今回のために 1200bps のものを民間のメーカーと共同開発した。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。

電源系では、リチウムイオン電池は、まだ宇宙実証されていないものであるが、真空試験などを通して問題がないことを確認し、メーカーの承認も得てあえて使用した。CMOS カメラは本来 640×480 ピクセルのものであるが、オンボードでの画像記憶とダウンリンクの通信容量を考慮し、間引いて使用することとした。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。分離機構は、元々はアメリカの Calpoly という大学が3個 CubeSat を搭載して切り離す P-POD と呼ばれる分離機構を開発しそれを利用する予定であったが、Rockot に打ち上げ機が変わったことにより、東大で開発することとなった。図5のようなBOXタイプの分離機構の中に CubeSat を挿入し、ロケットからの信号が来たら、しばらく待った後、ニクロム線で釣り糸を焼き切る方式でバネヒンジ接続の蓋を開け、バネで CubeSat を押し出すタイプのものである。

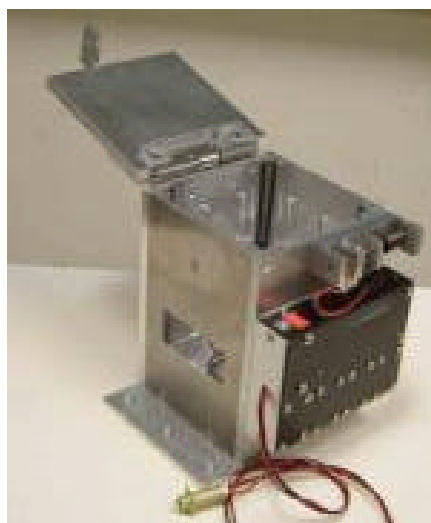


図5 CubeSat-XI の分離機構

CubeSat-XI の最大の特徴として、10cm 立方、1kg という超小型のサイズがあげられる。通常、大学で開発される衛星の主流は 50kg 級の「マイクロサット」であり、Stanford 大学の OPAL や SAPHIRE、サレー大学の UO-SAT シリーズ、ローマ大学の UNISAT、ブレーメン大学の BREMSAT など、多くのマイクロサットが大学で開発されてきた。10kg 以下とされる Nano-Satellite としては、2000 年にサレー大学が打ち上げた SNAP-1 だけであり、その重量は約 6 kg であった。CubeSat はさらに小型であるため、必然的に容積や重量

管理は相当に厳しくなり SNAP-1 の機器さえその搭載が難しく、姿勢制御、放射線対策をはじめとして設計論も独自に追及しなくてはならない。一方で、おおむね重量に比例するといわれる打ち上げコストは大幅に低減でき、宇宙への「しきい」をより低下することができる。その意味で、CubeSat-XI は新しい衛星やその利用法のコンセプトを追求するベースとなりうると考えられる。

4.3 CubeSat-XI の開発の経緯

CubeSat-XI は 2001 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 FM 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をお借りしての熱真空試験と振動試験、都立航空高専の電波暗室をお借りしての電波試験などの、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宇宙科学研究所の気球を利用して実施した。2001 年 5 月に、三陸の気球基地より送受信機を搭載した気球を放球し、40km の高度で約 1 時間にわたり、東大の地上局との間での直線距離約 500km の通信実験を実施し成功した。あわせて衛星へのコマンドング、テレメトリのダウンリンクなどの衛星運用模擬実験もすることができた。

4.4 CubeSat-XI の打ち上げと軌道上運用成果

2003 年 6 月 30 日午後 11:15(日本時間) CubeSat XI- は、ロシア連邦プレセツクより EUROCKOT 社の提供する 3 段ロケット Rockot により打ち上げられた。翌 7 月 1 日 0 時 48 分に無事に高度 824km の太陽同期円軌道に投入された。同ロケットには東大の CubeSat のほかに、CUTE-1(東工大の CubeSat)、デンマーク(2 機)・カナダ・アメリカの CubeSat 計 5 機と CubeSat 3 機分の大きさのアメリカの QUAKESAT、および MIMOSA、MOST という 60kg 級衛星も搭載されており、Rockot の上段ロケット Breeze-KM が順次これらの衛星を所定の軌道に投入していった。7 月 1 日午前 4:36 の最初の日本通過パスで、東京大学および菅平の電通大に設置した無線局において、CubeSat XI- からの CW ビーコンを受信、衛星が問題なく軌道に投入され、正常に機能していることを確認した。次のパスでは、午前 6:18 にアップリンクを実施し、それに応じてダウンリンクを得ることができ、通信リンクが確立した。

最初の作業は CubeSat XI- の軌道を推定することであった。当初、NORAD のレーダーでは 10cm の物体は認識できないであろうとの判断のもと、ドップラーシフトを利用して軌道推定するプログラムを用意していたが、切り離し直後に NORAD から同時に 8 個の軌道データ(そのうち 6 個はほぼ同じ軌道)が公表され、どの軌道がどの衛星のものであるかの議論が世界中のアマチュア無線家の間で数日間にわたって巻き起こった。東京大学では、AOS、LOS のタイミングと、実際に計測されるドップラーシフトと各軌道候補から予想されるシフトの比較から軌道の特定を行った。実際には、ドップラーシフトの予測と実

測値が完全に一致する軌道は見つからなかったが、これは、CW 送信機の発振器が温度等の影響を受けて微妙に周波数変動することが原因と判明し、予測と実測値が一定のバイアスを持って推移する軌道候補を探索し、数日で特定することができた。

衛星のステータス取得、および CW 信号に含まれるステータス情報から、当初は衛星内部の電源電圧が極めて低く、温度も約 - 50 度と非常に低温であるというデータが得られた。しかし電池電圧と電池温度のテレメトリ履歴を取得し、実際には電池はフルに近い状態で問題がないことが判明した。低温に見えた原因は、温度センサーを A/D 変換する際のリファレンス電圧が、太陽電池の発電電圧が予想以上に高かったせいで予想とずれていたことが原因であることが判明した。データ取得後にその換算を行って運用を続けているが、衛星内部は - 10 度から 50 度という安定した温度環境にあることがわかった。

XI- はジャイロを搭載していないため姿勢運動をダイレクトに推定することはできないが、6面に搭載した太陽電池での発生電流を元に間接的に姿勢運動を推定することができる。以下に定性的にその変化を述べる。切り離し当初はタンプリング状態であったが、数日で次第に最大慣性モーメント軸（慣性主軸）周りのスピン状態に遷移した。ついて、その周期が 20 秒程度から 100 秒程度に遅くなったが、これは、搭載したヒステリシスダンパーの効果でダンピングがもたらされた結果である。回転が遅くなると、搭載永久磁石と地磁気との干渉の結果、一軸回転状態からタンプリング状態に推移し、また再び慣性主軸周りの回転に戻るなど、複雑な姿勢変動を行っている。奇妙な現象として、時々回転の周期が短くなることも経験した。これは、エネルギー拡散の原則からして説明しにくい現象であるが、地球の極域で地磁気の向きが急に変わる場所を通過する際に、永久磁石の効果で回転が一時的に加速されるのではないかと、という仮説を立てている。現在、地上でシミュレーションと理論的解析により、この現象の解明を行っている。

4.5 宇宙環境下での機器の動作

放射線、真空、変動する温度環境下で機器はすべて正常に動作した。特に超高真空下の温度変化の激しい環境下でリチウムイオン電池の異常が心配されたが、特に問題なく、当初の食がある時点においては正常な充放電が観測された。また、軌道が太陽同期軌道で降交点の地方時が夕方 6 時の軌道であるため、1年の多くの時間が全日照（地球による食のない状態）であったため、バッテリーもほぼ満充電の状態が続いている。

OBC は打ち上げ直後の 2 ヶ月で 9 回程度のリセットを経験したが、放射線に起因する SEL への対策としてのリセットがかかったのではないことが判明した。地上にある XI-IV のバックアップ機である XI-V を用いて検証実験を実施し、ソフトウェアの非常に細かな問題点が原因であることを発見した。なお、リセットは頻度も少なく、運用にはほとんど影響はなかった。

2005 年 2 月現在、1 年 7 ヶ月を超えて健康に動作している。途中大きな太陽フレアを 2 回経験した（2003 年 10 月、2005 年 1 月）が、影響は見られていない。ただし、2004 年末ころより、オンボードの EEPROM の 2 個上でデータのビット反転が多々見られ、7 個あった EEPROM は現在 5 個を使用して運用を続けている。EEPROM は書き込み回数に制

限があり、宇宙だとその制限値が低くなるのではないかという仮説をもって、現在検討を進めている。このような現象とその解明は次のプロジェクトにつながる極めて重要な情報になるので、大事にしていきたいと考えている。

4.6 画像の取得とダウンリンク

東大 CubeSat には CMOS カメラが搭載されており、アドバンスドミッションとして地球の画像を撮影する仕組みを備えている。画像保存用に 7 つの EEPROM が用意されており、1 つの ROM に 1 つの画像を保存できる。上書きや撮影命令は、基本的にアップリンクコマンドにより行う。画素数は $128 \times 120 = 15360$ (pixel) で、1 画素あたり 2 バイトからなり、1 枚あたりのデータ量は、明るさなどのステータス情報を含めて 30786 バイトである。カメラレンズは、焦点距離=6mm、F 値=1.8 である。また画角を計算したところ、縦横共に 35 度程度となった。これにより、高度 820km 程度では地表面で 510km ~ 530km 四方が写りこむことが分かる。

衛星は姿勢制御をしていないために、地球を見た瞬間に撮像されないと地球は写らない。また、ダウンリンクの通信容量は 1200bps と細いために、やみくもに撮っては下ろすことも不可能である。このコンフリクトする要求を満たすために、異なる時間を指定して 7 枚の画像を取得して別々の EEPROM に貯め、各 ROM には画像を特徴を表す（たとえば、黒の割合や平均の輝度など）ヘッダをつけ、その情報をダウンリンクして、良い画像だと思われる EEPROM から優先的にダウンリンクするという戦略をとった。また、ダウンリンクに際しても、いわゆるサムネールの粗い画像を最初おろし、見込みがありそうだったら精画像をおろすようにすることにより、効果的に良好な画像を選択的におろすことができた。それでも、通信障害などの原因で、現在、1 枚の画像を降ろすのに 2, 3 日かかっている。図 6 にこれまでに取得した画像のうち、3 枚を乗せる。



図 6 CubeSat-XI が撮影した地球画像例

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た。配信システムとして「さいめーる」というソフトウェアを開発し、2003 年 6 月 8 日より「データ配信サービス」として正式に登録を募集開始したが、もっとも多いときで約 1600 名の登録をいただき、一般の方からの応援メッセージを得るなど、交流を果たせた。現在の日本

の宇宙開発はこのような得られた成果の社会還元が不足している。今回の試みは、その一つのモデルを提示することを意図したものである。

4.7 東京大学の小型衛星開発の将来計画

CubeSat 1号機の流れを受け、今後、我々の研究室では、超小型衛星によるリモートセンシングを衛星研究・開発の一つの柱にする計画である。現在世界最高分解能はIKONOS等の50cm~1mであるが、衛星や地上システムの莫大なコストのために1枚の画像が極めて高価になり、また、望みの地上の写真をとる自由度が少ないなどの理由で、リモセン画像が当所予想されたような大きな市場とはなっていないのが現状である。

それとは対極的に、分解能は悪くとも(10m~30m程度)低コストの画像を提供でき、また望みの位置の映像を取れるフットワークを提供することで、超小型衛星は、リモセン画像利用ミッションの裾野を広げられるのではないかと考えている。また、1機の衛星および運用コストの低減は、複数の衛星(コンステレーション)の利用を可能にし、特定地域への再帰間隔を縮めることにより災害監視などの緊急ミッションへの対応も容易にすると思われる。技術的にも、超小型の制約の中で必要な光路長と口径をいかに獲得できるか、画像取得時の姿勢制御をどのようにするかなど、チャレンジングで興味深い課題がたくさんあり、研究・教育的にも意義があると判断している。

以上の長期計画の次のステップとして、2002年1月、従来のCubeSatよりは少し大きめの衛星を目指すCube-IIプロジェクトをスタートさせた。近年、50kgクラスで分解能10m程度の地表画像を撮影する小型衛星が開発されている(英国Surrey大学UoSat-12, 独国ベルリン工科大CLR-TUBSATなど)。東大では、これらの衛星よりさらに1桁小さい3~5kg(15cm立方のサイズ)で30mに近い地表分解能を達成するリモートセンシングミッションを目指している。高解像度の画像を取得するには、長い焦点距離をとる必要があり、通常これが衛星サイズの増大につながるのだが、Cube-II(現在はPRISMと名称が変わっている)ではレンズの付いたブームを伸展することによりこの問題をクリアする。そのための展開機構はすでに開発済みである。

図7に東京大学の衛星開発の将来計画を載せる。まず、2005年上半期にCubeSat XI-IVの姉妹機XI-VをロシアのロケットCOSMOSで打ち上げる。XI-VはほぼXI-IVと同じハードウェアを持つが、画像分解能の向上、連続撮影機能の付加などソフト面で大きな改造がなされているほか、新型太陽電池の実験も実施する。

PRISM以降は、実ミッションの実現を目指した開発を行う予定である。PRISMと平行して、国立天文台と共同で、星図を撮る科学ミッション衛星Nano-JASMINEの概念設計を2005年からスタートし、また、NEDOの予算で東大阪の中小企業と共同で新しいパネル展開型衛星PETSATを開発し、衛星を使った雷観測を具体的なミッションとして目指している。(超)小型衛星は技術検討だけでなく、新しいタイプの宇宙利用層を開拓していくことが重要であると考え、従来宇宙とは関係のなかった職種の人たちとの、超小型衛星の利用法についてのブレインストーミングなども実施している。

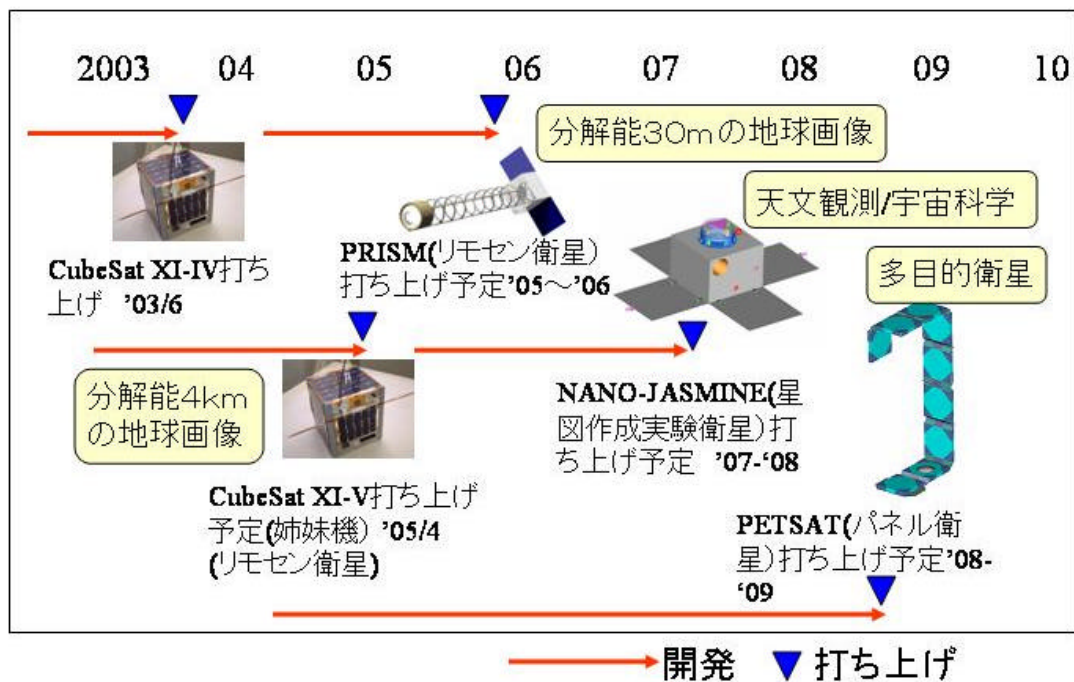


図7 東京大学での小型衛星開発のロードマップ

今後の開発の中で特に注意していることは、ややもすれば機能の強化を狙って衛星を大型化したくなるところを押さえて、大学でマネジメントできる範囲内(10kgまでと考える)の衛星にとどめておき、その枠の中でどこまでの能力を実現できるかを狙う、という姿勢を貫くことである。それが、大学流のフットワークの軽さを固持し、現在の重厚長大で閉塞感漂う宇宙開発とは別の大学流の貢献をもたらすと考えている。

5. 日本における他の小型衛星プロジェクト

CubeSatは2005年に日本大学、東京大学が打ち上げる予定で、それ以外にも創価大学、東京都立航空高専等が開発中である。CanSatおよびCubeSat以外にも、日本では現在次のような小型衛星プロジェクトが進行中である。

- 1) 鯨生態観測衛星：千葉工大が進める衛星プロジェクトで、鯨につけた発信機からの信号を衛星がキャッチし、鯨の位置を計測することにより、その生態を観測する。2002年12月にH-IIAのピギーバックとして打ち上げられ、現在もまだ軌道上で運用されている。千葉工大では同型機があり、打ち上げを待っているほか、それをベースに小型衛星のシリーズ化を目指している。
- 2) μ -LABSAT：宇宙開発事業団(現JAXA)が開発した50kg級小型衛星で、三軸バスの実証実験と同時に、通信総合研究所(現NICT)航空宇宙技術研究所(現JAXA)東京大学がその上での軌道上サービス技術関連の実験を行った。やはり2002年12月

に H-IIA のピギーバックとして打ち上げられ、民生品ベースの画像取得システムの実証など、さまざまな実験が成功裏に行われた。東京大学もタンブリング物体の運動認識と姿勢制御実験などで参加し、2003年5月の軌道上実験では大きな成果を収めた。

- 3) INDEX：宇宙科学研究所が進める小型衛星プロジェクトで、種々の先進的工学実証実験、観測等を計画している。
- 4) QPS・QTEX：九州大学が進めるテザー実験衛星プロジェクトで、九州の地元の中小企業との連携も始めている。
- 5) 北海道衛星（農業用リモートセンシング衛星）：北海道工大が中心になり、北海道の企業と共同でハイパースペクトラルカメラを持った農業用衛星を開発している。NPO 法人である北海道宇宙科学技術創成センター（HASTIC）がバックアップしている。

6．小型衛星による低コスト・迅速な宇宙開発の試み

6．1 欧米に見る小型衛星開発の特徴

本章では、欧米の小型衛星開発の例、CubeSat の経験をもとに、小型衛星アーキテクチャおよびその開発方法の特徴と、小型衛星が宇宙開発にもたらす貢献について議論したい。

アメリカ・ヨーロッパなどにおいては、国家が主体となって技術開発の舵取りを行い、国立研究所、大手メーカーに研究委託をするような、いわゆる「トップダウン型」の技術開発と、大学、ベンチャー企業が、独自のアイデアをもとに試行錯誤的に新しい技術を開発し、それを大学を中心とした低コストで教育目的の小型衛星上で「気軽に」宇宙実証していくという、「ボトムアップ型」の技術開発がバランスよく行われ、宇宙開発の活力を生んでいるといえる。国側も、後者の有効性をしっかりと意識しており、後者の方式でたくさんの技術シーズが自由に生まれてくることを妨げず助長し、国はその中に、国としての宇宙開発のシナリオ、あるいは技術開発のロードマップに適合するものがないかを目を光らせていて、良いアイデアがあるとそれに多額の援助（Grant）を行って一気に開発に持っていく。このような政策を何年もとってきた結果、優れたアイデアと技術を持った大学、ベンチャーは成長し、宇宙開発の一翼をしっかりと担うまでに成長してきている。

イギリスにおいては、Surrey 大学が 1981 年より手作りの小型衛星作りを始め、現在は SSTL（Surrey Satellite Technology Ltd.）という会社に発展し、100 名をこえるスタッフを抱える組織になっている。現在までに UoSAT シリーズとして 20 個近い 50 kg 級マイクロサットを作ってきており、最近では 5 kg クラスのナノサット（SNAP: Surrey Nanosatellite Application Platform）にまで挑戦している。50～100 kg 級の衛星が主力で、DMC（Disaster Monitoring Constellation）という名前で数カ国の出資のもと災害監視のリモセン衛星のコンステレーションを打ち上げたのは記憶に新しい。最近では、韓国でも同様の動きが起こり、SatReCi というベンチャー会社がマレーシアの衛星を受注

するまでに発展している。ドイツでもブレーメン大学やベルリン工科大学が独自の衛星を開発し、アメリカではスタンフォード大学、ユタ州立大学、アリゾナ州立大学などを始め、10以上の大学で衛星づくりが行われ、また大学を卒業した研究者や大企業をスピンアウトとした経験者などが多数の小型衛星ベンチャー会社を設立し、しのぎを削っている。

小型高機能技術においては、特に、その基礎研究段階においては、アイデアの創出と試行錯誤がきわめて重要で、国家主導によるトップダウン的研究よりは、大学・ベンチャーの多くの頭脳による「多数のアイデアの創出 + 自然淘汰」的な研究開発スタイルが適していると思われる。そのような種をまくために、欧米では大学・ベンチャーへの研究資金援助を広くコンスタントに行っている。重要なのは、宇宙関連の学科・企業だけでなく、非常に広い分野にわたってプロポーザルを集め資金援助を行っていることであり、それが宇宙開発技術の底辺を広げ、新しい技術の目が出る可能性を広げている。

小型衛星の開発においても、特に大学は、その自由な発想とネットワークの軽さ、多分野のコラボレーションがやりやすい、多くの労働力とアイデアを利用しやすい、という特徴を利用して、独自性を出している。大学においては、衛星の開発は教育の一環という位置付けであり、必ず成功してミッションを実行するものを作るというよりは、ミッション・アイデアの創出、設計、製作、試験、運用のフェーズを学生に経験させることが目的であるため、失敗に対する許容度が大きい。その結果、通常の衛星ではリスクであるような先進的な技術を試すこと、民生品を使って安価に、かつ部分的には（コンピュータなどは）高機能のものを作ること、非常に短期間に（1～2年）設計から打ち上げまで行うこと、などが可能となり、宇宙開発の中で特色のある貢献を行っている。

たとえば、これらは小型高機能の部品やサブシステムの迅速・安価で「気軽」なテストベンチを提供しており、大手メーカーや国研などは、研究開発中の先進的な機器を、通常の（お金のかかる）衛星に搭載して試験する（この場合は失敗はあまり許されない）前に、そのような衛星にのせてプレ試験を実施することが多い。例として、スタンフォード大学で製作し、2000年に打ち上げられた OPAL という衛星から放出された超小型衛星（PICOSAT と呼ばれる）では、DARPA の MEMS を利用した機器の試験も行われた。大学と大手メーカー・国研は、大学がそのような衛星テストベンチを提供する代わりに、大手メーカー・国研が打ち上げ機会や部品を提供するというような、きわめて効果的な give-and-take 関係を実現していることも宇宙開発の活性化につながっている。

このような大学の衛星開発を助長するため、たとえばアメリカはこれまでいくつかの支援プログラムを用意してきたが、現在走っているものとして有名なものに、University Nanosatellite Program がある。これは、Air Force, DARPA, NASA などからの FUND を、セクションされた10の大学に分配（1大学あたり年600万円程度）して衛星を開発させ、スペースシャトルで一斉に打ち上げるといったプログラムである。さらに、将来技術として注目を集めている Formation Flying を実験として行う大学には、総額1.4億円をその大学数で割った額が NASA Goddard Space Flight Center から追加支給され、大学の多くの手でフォーメーションフライト関連技術を一気に実験しようという国の方針を打ち出している。衛星開発の資金援助も大事だが、打ち上げのスポットを用意してくれている

ことは、大学にとって大きなモチベーションとなっていることは見逃せない。

6.2 教育の先にある(超)小型衛星の目的と開発戦略

我々の超小型衛星開発活動は教育目的が第一義であるが、そのみを狙ったものではなく、技術創出段階における試行錯誤の「手」を増やすことで宇宙開発の底辺をひろげ、革新的な技術に対し迅速で安価な技術実証手段を提供するという点において、宇宙開発に大学独自の貢献をし、閉塞的になっている日本の宇宙開発を活性化することをも目標にしている。

従来の衛星が数 100 億円のプロジェクト費と5年を超える開発期間が必要である状況では、宇宙で何かをやろうと考えるほとんどの個人・研究機関・企業は手が出せずに、「宇宙の実利用は夢」のイメージのまま終わる。しかし、(超)小型衛星による宇宙利用の開拓により、1プロジェクトが5000万円以下、開発期間も1年未満となれば、宇宙で新しいこと(ビジネス、宇宙科学)を試してみよう、と考える個人・企業が出てくることが期待される。最初のステップが小さくとも、そこで成功経験が得られれば、次にはもっと大きなプロジェクトに投資してみようとするようになるだろう。要は、最初の一步の「しきい」をどれだけ下げられるかが、宇宙利用が広がるかどうかの鍵であると考え。我々は「宇宙で何かをやろうと考える人の数を100倍にしよう」を合言葉に、宇宙以外の分野の企業との交流を進め、新しい宇宙利用に向けての検討を開始している。

そのためには、大学は以下のような、大型・中型衛星とは一線を画す開発戦略を持続することが重要であると個人的には考えている。

- 1) 「絶対失敗してはいけない」という超高信頼性を目指すものではなく、新しい技術を試すような、多少信頼度が下がっても良いというミッションが適している。いたずらに信頼度を高めることは、小型衛星の持つ、簡潔性、短期開発性を損なうからである。地上試験に関しても、従来のように徹底的に実施するのではなく、一部は軌道上で実証し、その成果を次につなげる(Heritage化)という姿勢が必要であろう。
- 2) 信頼性は1機で獲得するだけでなく、多数機を使っても獲得できる。つまり、複数機を打ち上げることにより1機が故障しても全体の機能が少しダウンするだけですむ(グレースフルデグラデーション)ようにするか、あるいは、寿命は短くても壊れたらどんどん追加で打ち上げできるようにする、というスタイルをとるべきである。後者の戦略は、動きの早い地上における最新の技術を衛星に搭載できるというメリットもある。その点も考慮し、適正な寿命設定があるはずである。
- 3) 試行錯誤による新しい機器や衛星のアーキテクチャを積極的に探していく姿勢が必要である。そのための開発方式としては、中大型衛星で通常取られているウォーターフォール型(設計 製造 試験がおおむね一方通行であり、でもどりがないように、各段階で書面によるPDR、CDRなどの審査を実施する)の開発戦略ではなく、早い段階から試作品を作っては、それを修正してだんだん洗練していく(したがって、正式な設計図は最後の段階になってやっと完成する)というスパイラル・アップ型の開発戦略が小型衛星には向いている。

- 4) そのためには、できるだけ、衛星全体をインターフェースの少ないサブ要素に分けて、それぞれにおいてローカルに工夫ができる余地を多く残すことが必要である。従来の中大型衛星でやられていたように、衛星全体の効率を最適化する（たとえば、あるミッションを実現する衛星の重量を最小化する）戦略をとると、各サブ要素をすべて視野に入れコーディネートしつつ設計を進めていかななくてはならず、インターフェース調整に要する手間や煩雑さが増し、小型衛星のメリットが損なわれる。
- 5) 打ち上げ機会に関しては、定期的なチャンスが提示されることがモチベーションを高める上で強く要請される。ただし、小型衛星開発は打ち上げ機会がなくとも進めるべきで、でき上がった小型衛星の Queue（待ち行列）を作っておき、打ち上げ機会が見つかったら、軌道条件に合うものの中で一番前に並んでいる小型衛星を打ち上げるといった戦略がのぞまれる。

6.3 大学における衛星開発の支援団体としての UNISEC

大学におけるこのような活動を支援し、さらに強化していくためには、宇宙機関やメーカーからの資金・技術・試験設備・部品提供などの面でのサポート、衛星の周波数獲得・輸出などの手続き的な面での指導などがきわめて重要であると考えられる。特に、CubeSat の経験からは、周波数の獲得、打ち上げのアレンジを迅速にできることが緊急の課題である。また、大学側としても、技術交流、経験やノウハウのトランスファー、機器の共同開発・共同購入、試験の共同実施などの面で、いっそうの連携強化を図っていく必要がある。

このような目的を果たすために、2002年には大学宇宙工学コンソーシアム（UNISEC）を設立し、2003年2月には東京都からNPO認定を受けた。（<http://www.unisec.jp> 参照）。2005年1月現在、21大学からの31研究室・グループが加盟しており、サポートする側の会員・会員団体も60を超えた大きな組織になりつつある。引き続き、大学間だけでなく、企業、国研とも協力し、また一般の宇宙に興味を持つ人をも巻き込んだ、大きなコミュニティにしていくべく、努力を続けている。我々の活動の趣旨をご理解いただき、関係各方面からの一層のサポート、UNISECへの参画をお願いしたい。

7. まとめ

本稿では、日本における大学衛星の開発の現状を紹介し、欧米の例ともあわせて、小型衛星の特徴、目的、意義、宇宙開発にもたらす貢献について議論してきた。大事なことは、小型衛星は中・大型衛星をただ小さくしただけではない、ということである。そこには小型衛星のメリットを最大限発揮できる、衛星アーキテクチャ、開発戦略、信頼性管理法、プレーヤー（開発者）利用の仕方、そして国の施策があるべきである。

UNISECに所属する多くの大学では、「学生」という若いプレーヤーが、ここ数年来、非常な情熱を持って衛星開発を進めつつあると同時に、プロジェクトの中で、宇宙開発に必要なさまざまな能力を鍛錬してきている。彼らの情熱と能力をいかに国の宇宙開発の大きな絵の中に取り込んで活性化につなげていくか、われわれ大学関係者だけでなく、国としても真剣に考えていただきたいと願うばかりである。

<参考文献>

- [1] 東京大学中須賀研究室 URL(CANSAT,CUBESAT など)
<http://www.space.t.u-tokyo.ac.jp>
- [2] 松永三郎、中須賀真一、"日米小型衛星開発プロジェクトCanSat" 第43回宇宙科学技術
連合講演会、神戸、99-2A6, 1999.
- [3] 永島隆、他: "CANSAT東大ミッション - 展開型太陽電池膜の基礎実験について - 、"
第43回宇宙科学技術連合講演会、神戸、99-2A8, 1999
- [4] 中須賀真一、松永三郎、"CanSat計画 日米大学による手作り小型衛星への挑戦"、
日本航空宇宙学会誌、Vol.48, No.562, pp.589-596, 11月号、2000
- [5] 津田雄一、他、"超小型衛星「CUBESAT」による遠心力膜展開実験について"、第44回
宇宙科学技術連合講演会、福岡、00-3E7, 2000
- [6] N.Sako, Y.Tsuda, S.Ota, T.Eishima, T.Yamamoto, I.Ikeda, H.Ii, H.Yamamoto, H.Tanaka,
A.Tanaka and S.Nakasuka, CanSat Suborbital Launch Experiment - University Educational
Space Program Using Can Sized Pico-Satellite, Acta Astronautica, Vol.48, No.5-12, pp.767-776,
2001
- [7] 永島隆、他、東京大学 CANSAT2000 (第一報:落下速度制御と着陸装置実験) 第44回
宇宙科学技術連合講演会講演集、下巻、福岡、00-3E5, pp.1453 - 1458, 10月、2000.
- [8] 稲葉歩、幸松洋介、宮村典秀、中須賀真一、東京大学CANSAT2000 (第二報: DGPS
航法実験) 第44回宇宙科学技術連合講演会講演集、下巻、福岡、00-3E6, pp.1459 - 1464,
10月、2000.
- [9] 中須賀真一、大学小型衛星による新しい宇宙開発への挑戦(現状と将来展望)、日本機
械学会 2001年度年次大会、福井、8月、2001.
- [10] 永島隆、他、CanSatからCubeSatへ 東京大学における小型衛星プロジェクトの経緯
と展望、日本機械学会2001年度年次大会、福井、8月、2001.
- [11] 宮村典秀、他、ARL ISS2001における東大CanSatのFly Back実験、第45回宇宙科学技術
連合講演会、01-3D8, 浜松、10月、2001
- [12] 中須賀真一、酒匂信匡、津田雄一、永島隆、船瀬龍、中村友哉、永井将貴、東京大学
CubeSat-XIの軌道上実証成果と超小型衛星による低コスト化・短期開発化の試み、電
子情報通信学会和文論文集B, 2005年1月号