

# 小さな衛星が宇宙開発と教育を変える

## —宇宙開発革命と「問題解決教育」の重要性—

東京大学 大学院工学系研究科

中須賀真一

東京大学をはじめ日本の多くの大学では超小型衛星の研究開発を行い、それが宇宙開発やビジネスの新しい潮流を生み出してきた。超小型衛星やその鍛錬の題材である CanSat は工学教育においても効果的な題材である。本論文では、超小型衛星開発の概要、その特徴、そしてそれを利用した教育の効果について議論する。

**<キーワード> 宇宙開発、超小型衛星、CanSat、工学教育、プロジェクトマネジメント**

## I はじめに - 超小型衛星による宇宙開発革命

### 1 1 kg衛星 CubeSat の誕生

私は大学で超小型衛星の研究開発に携わっている。超小型衛星とは一般に 100 kg以下の衛星を言う。これまでの JAXA や大企業の衛星が 500 kgから数トン、プレハブの家並みの大きさの衛星があることに比べると 100 分の 1 以下の「超小型」である。この小さい衛星が世界の宇宙開発の未来を切り開きつつあると同時に、教育にも大きな貢献をすると考えている。

2003 年 6 月 30 日、学生と一緒に手作りで開発した 1 kgの世界最小の人工衛星 XI-IV (サイフォー、図 1) と Cute-1 が打ちあがった。スタンフォード大学の Twiggs 教授が、「10cm 立方で 1kg の標準サイズの衛星 (“CubeSat” と言う) を作ってみよう」と 1999 年に世界に呼び掛け、大学・企業・宇宙機関の間で開発競争が始まったが、東大・東工大が最初に完成させ、最初に打ち上げに成功した。従来の衛星のコンセプトを大きく変える超小型衛星時代の幕を開けたのは日本の 2 大学であった。

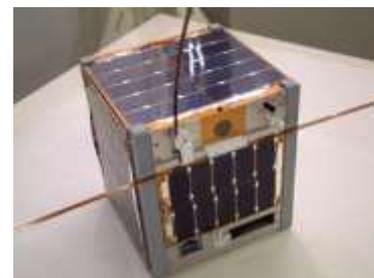


図 1 世界初の 1 kg衛星 XI-IV

### 2 超小型衛星のメリット

超小型衛星の目的は、一つには宇宙工学・もの作り・プロジェクトマネジメントなどの実践的な教育の題材。わずか 2 年ほどで、また、大学でも出せる程度の費用で開発でき、しかも実際に宇宙で動作する衛星の開発は、学生のモチベーションを高め、絶対成功させるぞとの強い気持ちが、素晴らしい教育題材に仕立て上げるのである。

もう一つは、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めること。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。超小型衛星の大きな特徴は、コストが中・大型衛星の 1 機数百億円に対し数千万円～数億円、開発期間も通常の 4～5 年に対し 1～2 年程度と極端に「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やプレーヤーを生むのである。たとえば、中・大型衛星 1 機分以下の値段で非常に多数の衛星を作り打ち上げることができる。衛星 1 機では同じ地域の観測間隔は 2 週間や 1 か月程度になってしまうのに対し、衛星がたくさんあれば毎日 1 回以上観測して「地上の変化」を把握することも可能になる。「数で勝負」というわけで、このような使い方を「衛星コンステレーション」と呼んでいる。

XI-IV と CUTE-1 によって開かれた超小型衛星の世界は、その後、世界的にも爆発的な発展・拡大を見せ、2026 年現在では、中大型衛星でないとできない一部のミッションを除いて、ありとあらゆるミッションに利用され、小型衛星のコンステレーション・ビジネスなどを行う数多くのベンチャー会社が世界中で生まれた。大学やベンチャーがメインプレーヤーであるが、その重要性に気付いたアメリカ、中国、欧州の政府も、日本も遅れたがこの分野に大きな投資をはじめ、宇宙開発利用の新しい潮流を作っている。2003 年当時の我々のビジョンがまさに現実のものとなっているのである。

## II 超小型衛星開発にとって重要な技術とプロセス

### 1 宇宙環境を克服する

宇宙は地球上とは異なる様々な環境があり、地上で作った衛星はその環境に耐えないといけない。たとえば、

- ・宇宙にある放射線が、特に半導体に障害を与える
- ・真空環境はいろんなものを蒸発させ、部品と部品がくっついてしまう現象を起こす。
- ・温度が太陽にあたるときは高温になり、地球の裏に入ると低温になるなど、広い温度範囲になる
- ・打ち上げ時にはロケットからはげしい振動や衝撃、加速度を受ける
- ・非常に遠くにあるので、通信も 1000 km 近い長距離に対応できないといけない

以上のような環境の違いを克服すべく、放射線試験装置、熱真空槽、真空槽、恒温槽、振動試験機、衝撃試験機、電波暗室などなど、たくさんの宇宙環境試験を地上で実施することで、宇宙で正しく動作することを確認することが必要である。しかし、宇宙環境の最も難しい点は、「壊れても修理に行けない」という点で、このようなシステムを「非修理系」と言う。地上のほとんどすべての機械は、壊れると修理でき、壊れなくても何年かに 1 回はメンテナンスするが、それが衛星ではできない。まさに一発勝負であり、故障が起こったときに「こうしておけばよかった」と後悔しても、もう遅いのである。

### 2 ミッションを考え出す

衛星開発の最初の一步は「ミッションを作り出すこと」である。宇宙に衛星を打ち上げるのは資金、労力、ロケットなどたくさんのことが必要で時間もかかる。それにもかかわらず打ち上げるのは、宇宙には地球にない特徴があるからである。高いところから 3 次元的に地球を見られることは、地球観測だけでなく、広い範囲に電波を降らせる必要のある通信・放送衛星や GPS 衛星などに最適だ。猛スピードで回りながら、地球を観測できる特徴は地球観測に向いており、大気よりも上にあるので、大気に邪魔されないですべての波長で星の観測ができる。また重力と遠心力が釣り合う衛星の中では見かけ上無重力状態となるので、長い時間の無重力実験ができる。宇宙の粒子や磁場の観測、あるいは惑星からのサンプルの取得はそこに行かないとできないわけで、それも衛星（探査機）を作る理由である。そのような宇宙の特徴を使って、どんなミッションを実現するか、それを考えることはたいへん大事な作業である。今世界が抱えている温暖化や食糧不足、エネルギー問題などの解決に向けて衛星がどう社会貢献できるか、また宇宙探査機によってこれまで知らなかった何を明らかにするのか、今後は、そのような地球規模課題解決に貢献するミッションを考えることも重要になっていくだろう。

### 3 ミッションを実現する衛星を「システム設計」する

ミッションが決まったら、それを実現する衛星の概念を作り、そこから詳細な設計に落とし込んでいく作業が始まる。衛星は様々な分野の技術の寄せ集めである。電子回路、コンピュータ、通信機、姿勢制御装置、太陽電池やバッテリー、観測装置などなど、多くの装置をまとめて、かつ宇宙の厳しい環境の下で生きるシステムを設計しないとけない。このような作業を「システムインテグレーション」と呼ぶ。その際には、様々な要求がお互いに対立することもある。たとえば、カメラが高分解能で地球の写真を撮ることを目指すと、姿勢制

御装置が高い機能を目指さないといけないこととなり、コンピュータは計算負荷が増大、電力もたくさん必要になる。しかし、衛星のサイズの制約から、そんなに大きな電力を発生する太陽電池パドルを載せられない、コンピュータ能力も十分にはできない、というようなことがよく起こり、その場合にはカメラの分解能を多少あきらめないと衛星は実現できない。このように、系ごとにばらばらに設計することはできず、全体のバランスを考えた設計をしていかないといけない。これがインテグレーションの意味である。

#### 4 開発をマネジメントする

超小型衛星といえども開発は 1~2 年にわたり、10 名以上のチームメンバーが関与する大規模プロジェクトとなる。またそれぞれの装置ごとにチーム（「系」という）ができるので、各系の開発メンバーの統制をとって衛星の完成に向けて同じ目標に向かって進ませる「プロジェクトマネジメント」が非常に重要となる。打ち上げまでに仕上げる時間の管理、決められた予算内で完成させる予算管理、各メンバーの強みを考えて適材適所に配置する人材の管理、何か開発時に問題が発生しても開発を継続するためのリスク管理の 4 つの管理が必要である。設計の中で「なぜこの設計になったのか」を文書として残しておくことも重要で、文書がないと、あとになって「あれ、なぜこの設計だったんだっけ？ こっちの方がいいから変えよう」と判断して、設計の初期に問題があるので捨てた選択肢を選んでしまうこともあり、それは大きな失敗につながる。文書管理も重要な作業といえる。

#### 5 再現性の高いモノづくりをする

あるシステムを設計図通り作っても最初からきちんと動くとはほとんどなく、何度も何度も試験をして、動かない理由を見つけて作り直して、だんだん動くようにしていくプロセスが必要で、そこには改良する工夫や粘り強さが必要である。また、衛星は何度も試行錯誤してたくさんのモデルを作るので、一度うまく動いた部分は、次のモデルにおいても確実に動かないと、いわゆる「もぐらたたき」状態、つまり、うまく動かなかったところを動くようにしたら、もともと動いていた部分が動かなくなってしまう、ということも起こり、永遠に全部が動く状態が実現できない。それを避けるためには、動く設計と工作ができれば、それが次のモデルにおいても確実に動くようにする「再現性の高いモノづくり」が必要である。

### Ⅲ 超小型衛星開発の登竜門「CanSat」

#### 1 鍛錬の場である CanSat 実験

東京大学の私の研究室では、1999 年ごろより超小型衛星の研究開発を進めてきた。いきなり宇宙に打ち上げる衛星開発は難しいので、最初に手がけたのは 350ml のジュース缶サイズの衛星で、その名の通り“CanSat”と呼ぶ。

CanSat はスタンフォード大学 Twiggs 教授により 1998 年の大学宇宙システムシンポジウム (USSS) 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 (図 2 など) を作り、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 3.6km まで打ち上げる計画 (ARLISS: A Rocket Launch for International Student Satellites、図 3) がスタートし、1999 年以降 2025 年現在も、毎年、砂漠での打上げ実験が行われている。当初日本からは東大、東工大だけの参加であったが、現在は日本から 12 大学以上、世界からも多くの国の大学が参加する国際実験イベントへと成長した。CanSat はロケットから放出されるとパラシュート



図 2 CanSat の例 (2000 年のもの)



図 3 アメリカでの CanSat 打上げ

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、たとえば、カメラの方向を変えて画像取得する実験、複数機による編隊飛行の実験、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実験がなされてきた。宇宙にまでは打ち上げられないが、CanSatを経験した多くの日本の大学がその後、衛星開発をはじめ、打ち上げに成功している。CanSatはまさに実衛星開発の登竜門なのである。

2001年からは、砂漠の上に目標地点を決めてその緯度経度をCanSatに教え、ロケットから落下後、目標点まで自分の力でもどってくる精度を競うComeback Competition（「戻ってこい競争」）を始めた。飛行しながら帰ってくるフライバックタイプや着陸後にパラシュートを切って目標点を目指すローバータイプ、さらにドローンタイプなど、世界中の大学学生のアイディアの詰まったさまざまなCanSatがしのぎを削っている。これも、目標点に到達するというミッションをどう実現するかを考える、優れた工学教育の題材となっている。

## 2 簡単なCanSatを使った小中高校生向けCanSat講座

通常のCanSatは電子回路なども実装した衛星に近いものであり、電子回路を十分勉強してからでないと開発できないが、もっとシンプルで身の回りの材料で短時間で作れるCanSatを使った、1～2日くらいでできる小中高校生向けの教育イベントを多くの地域で開催し、その数は13の都道府県に上っている。福井県では、2017年より教育総合研究所と共同で、3日ほどかけたCanSat開発講座を開催してきた。私が宇宙開発や衛星、CanSatの基本的な講義をしたあと、チームに分かれて、あるミッションを持ったCanSatを作ってもらい、それを気球やドローンで50～100mほどにあげて落下させ、そのミッションの優劣を競うコンペティションである。たとえば、「50mから落下して地面に到着するまでの時間をある秒数に近づける」とか、「途中でCanSatが二つに分離して、できるだけ離れた地点に着陸する」「落下中のCanSatの回転数を競う」というようなミッションを与え、それに向けて各チームがアイディアを出し、何度か実験を経て、最終フィールド試験に向けて仕上げていく。屋外での試験が難しい場合は、体育館をお借りして、天井近くの梁にひもを通して、それでゴンドラを持ち上げてCanSatを10m程度の高さから落下させ、ミッションを実現する能力を競う。体育館内でよく利用したミッションは、先の「落下時間をある値に近づける」に加え、「着陸したCanSatが直立する（図4は直立するCanSatの例）」「着陸の衝撃で風船が割れる」などであり、いくつかのミッションの総合点で評価する。

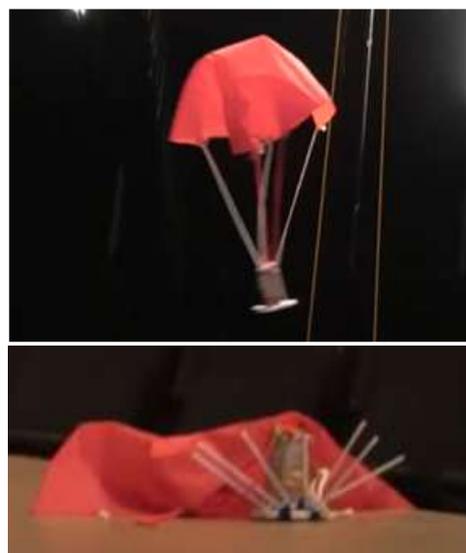


図4 着陸時に直立するCanSat

電子工作までは必要ではなく、生徒さんは、4～6名程度のチームの中でアイディアを出し合い、議論しながら、自分たちで作れるCanSatの中でどう工夫すればそれを実現できるかを真剣に考える。思いもしなかったようなユニークなアイディアで勝負したチーム、素晴らしい工作技術でミッションを実現したチーム、事前の試験で試行錯誤しながら精度を上げていったチームもあり、教える側の我々もとても楽しんでいる。大事なことは、「どうやればいいか」を真剣に考えることで、そしてそのモチベーションを与えるのは「楽しい」そして「絶対勝ちたい」という強い思いであり、これは後述する「問題解決」で重要な要素である。

## IV 超小型衛星・CanSat開発を題材にした教育

### 1 「問題解決」を学ぶ

上述した超小型衛星やCanSatの開発は、特にIIで書いた技術やプロセスの必要性から様々な教育の題材にな

る。ここではそのいくつかを取りあげたい。

まず、全般的に述べると、これらの開発プロセスは「問題解決」であり、その鍛錬ができるという点を強調したい。あるミッションを実現するための設計・使い方を考えだし、それが実際にその通りに動くまで衛星や CanSat を作りこんでいくプロセスは問題解決に他ならない。図5における右向きの矢印の流れは「前向き推論」と言

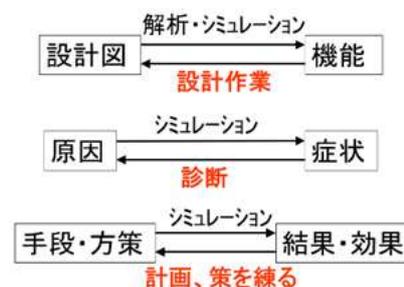


図5 前向き(右向き)と後ろ向き推論

って、例えば、衛星などにおいて、設計図があったときに、どんな機能を実現するかを考えるプロセスである。これは、論理的に考えたり(解析)、シミュレーションを行えば、比較的容易に想像はつく。一方、「こんな機能をさせるためにはどんな設計が必要か」を考えるプロセスは「後ろ向き推論」と呼ばれ、そう簡単には考えつかない。2つ目の「診断」において、症状から原因を探るプロセス、あるいは「ほしい結果・効果」からそのための「手段・方策」を導き出すプロセスも「後ろ向き推論」である。よく考えると、人生における様々な作業は、この後ろ向き推論が多いことがわかるだろう。ところが、現状の学校教育においては、この後ろ向き推論を鍛錬する機会が非常に少ない。「この知識を持ちなさい」「このやり方を記憶しなさい」ということを、「その知識ややり方をどんな場面でどう使うのか」を説明することなく強要するケースが多いのではないかと思う。たとえば、数学や物理、そのほかの様々な学問は、問題解決をする過程で、その知識がないと問題解決できない、という段階になって勉強すれば、よりモチベーション高く(なぜなら、解くために必要だから)勉強することになり、かつそれを利用するプロセスまで経験するので、より身につくのではないだろうか。衛星開発においては、電子回路や通信など、我々の航空宇宙学科では日ごろから教育していない分野も、学生は必要に応じて独自に勉強して、衛星開発に応用する。「それが必要だから」である。このような教育を小中高校の教育にもっと取り入れるべきで、その観点でも CanSat は非常に効果的な教育ツールといえる。

## 2 プロジェクトマネジメントチームワークを学ぶ

衛星や CanSat 開発は一人ではできない。多くのメンバーがチームワークを発揮し、リーダーが適切なプロジェクトマネジメントを実施しないといいものはできない。チームメンバーが持つ経験や知見、アイデアを足し合わせてどう問題解決するか、アイデア出しに強い人、手先が器用でモノづくりに強い人、実験を計画し運用するのに強い人、記録をとるのが好きな人など、各メンバーの持つ様々な強みを効果的に組み合わせて、1+1が2以上の結果を生むような組織づくりが必要である。プロジェクトマネジメントは、このようなチームワークのガイドはもちろんのこと、メンバーの様々な意見、時として対立するような意見を議論の中で収束させていくリーダーシップが大事であるだけでなく、チームを鼓舞し続けて高いモチベーションを維持することや、メンバーが倒れるなどの課題が発生した時に適切にメンバーの配置換えをして、開発を維持するなどの応急措置もとらないといけない。このようなチームワークやリーダーの素養は、教室の中の講義だけでは身につかない。実践的なプロジェクトの中で、時に痛い思いをしながら(やらなかったら大変なことになったというような経験をしながら)身につけていかないといけないものである。

## 3 教育効果をもたらすには高いモチベーションが必要である

以上のような教育が効果をもたらすのに必要な要件が一つある。それは、どうしても成功させたい、何かを手に入れたと思う強いモチベーションをもって参加することである。「できるところまで出来たらいいや」というような甘い考え方で開発では、十分な教育効果は得られない。高いモチベーションを持たせるための仕掛けが必要で、幸い、我々がやってきた超小型衛星においては、「衛星を作って宇宙で動かす」ということが極めて強い学生のモチベーションにつながっていたことが、16機もの衛星の開発に成功した理由である。さらに、開発初期においては、「世界初の1kg衛星を創っているんだ」という感覚、またそれ以降の衛星において

も「世界初の 50 kgクラスの深宇宙探査機の開発」「世界初の 11 kgで 2.4m分解能の獲得」など、それぞれの衛星ごとの開発のモチベーションを強く持って開発できたことが良かったと感じる。また、Comeback Competition や小中高校生向け CanSat 講座では、明確な評価基準を与えて競争形式にすることが、参加者のモチベーションにつながったといえる。そのようなモチベーションを教育者側で提供する仕掛けが重要である。

## V 最後に

江戸時代の島津藩において「薩摩の教え・男の順序」という訓話が代々伝わっている。「男」は「人」と読み替えて、これはどのような人を高く評価すべきか、を示したものと考えたい。以下の順番である。

- 一、何かに挑戦し、成功した者
- 二、何かに挑戦し、失敗した者
- 三、自ら挑戦しなかったが、挑戦した人の手助けをした者
- 四、何もしなかった者
- 五、何もせず 批判だけしている者

これは現代にも当てはまる、非常に重要な評価基準であると考ええる。現在の日本では、がむしゃらに何かを実現しようとしている人よりも、外からそれを冷ややかに見ている人、や、「そんなことをやるとこういう失敗が起こるから駄目だよ」と物知り顔で批判をするような人が「かつこいい」と思われる傾向はないだろうか。そんな風潮が社会に蔓延したら、日本の力はどんどん落ちていくであろう。その傾向はすでに始まっているのではないかとも思える。

我々が世界初の 1 kg衛星に挑戦した際には、「こんな小さい衛星を、しかも大学の学生が作るなんて誰もやったことがない、打ち上げてどうなるかはやってみないとわからない」状況であった。それでも、学生はその開発に高いモチベーションで参加し、素晴らしい開発をしてくれた。2003年に打ち上げた世界初の 1 kg衛星は、2026年現在もまだ動作し続けており、世界最長寿命の 1 kg衛星になった。たとえ失敗していたとしても、この挑戦は必ず次につながって、我々が誰かの手で成功していただろう。そのような挑戦が、日本のあちこちで起こり、それをみんなで応援するような社会になることを祈りたい。