

東京大学における超小型衛星開発の歴史と 超小型衛星設計および開発プロセスにおける議論点について

中須賀真一¹

¹ 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

概要

東京大学では 1999 年より超小型衛星の研究開発を行い、2003, 2005 年には CubeSat を、2009 年にはより実用的な利用を目指したリモートセンシング衛星 PRISM を打ち上げ、現在は、国立天文台と共同で位置天文衛星 Nano-JASMINE を開発中である。また、2010 年より内閣府の最先端研究開発支援プログラムによる全国規模の超小型衛星プロジェクトを指揮し、超小型衛星の研究・開発・利用をさらに進め、新しい宇宙開発・利用のパラダイムを構築する活動を行ってきた。その中で、超小型衛星特有の設計論、開発論があることを、また一言で超小型衛星と言っても様々なレベルや開発における考え方があることを経験してきた。本論文は、東京大学における開発の歴史を簡単に紹介し、それを踏まえ、超小型衛星の意義と特徴を整理したのち、超小型衛星の設計や開発プロセスにおける議論すべき点を概括し、今後の本ジャーナルへの投稿論文のテーマをいくつか提供することを目的としたい。

University of Tokyo's Nano-satellite History and Issues in Micro/nano-satellite Design and Development Process

Shinichi NAKASUKA¹

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

SUMMARY

University of Tokyo has been developing Nano-satellites since 1999, and successfully launched two CubeSats in 2003 and 2005, and launched a remote sensing satellite PRISM in 2009 to aim at more practical satellite application, and now is developing an astrometry satellite Nano-JASMINE in collaboration with National Astronomical Observatory of Japan. Since 2010, we also are leading the nation-wide micro/nano-satellite project to facilitate the research, development and applications of micro/nano-satellites in order to create a new paradigm of space development and utilizations. During these experiences, we have recognized that there are very unique design and process methodology suitable for micro/nano-satellite and also there are varied levels and ways of development for them. This paper will review the history of University of Tokyo's nano-satellite development, and based on that, will describe the characteristics and benefit of micro/nano-satellites, and pick up discussion items on the design and development process for micro/nano-satellites, which we hope to provide future themes for papers submitted to this Journal.

KEY WORDS: micro/nano-satellite, design methodology, development process

Received and presented December 10th, 2011 in 1st UNISEC Space Takumi Conference, Kitakyushu, Japan.

Revised March 15th, 2012. Accepted March 30th, 2012.

1. はじめに：超小型衛星の意義と課題

近年、従来の数トン級衛星ではなく、100kg～500kgの「小型衛星」が世界各国の安全保障、防災、都市計画、自然環境・気象観測、農産物の生産管理、科学調査等の様々な分野に利用され、また、大学・研究機関・企業等の宇宙利用のニーズが高まってきた。衛星小型化の技術競争の中で、日本は、100kg台の衛星開発では世界に遅れをとったが、次世代の宇宙利用を担う超低コスト・短期開発の50kg程度以下の超小型衛星では、諸大学・高専が2002年ごろより14機の打ち上げの実績を有し、重量や電力の制約の大きい超小型衛星で、低コスト・短期開発とそこそこの性能を両立したことは宇宙業界に大きな反響をもたらした。超小型衛星はもちろん中型・大型衛星と同レベルの機能は持ち得ないが、大きな教育的効果を持っていると同時に、実用化の側面においても、低コスト・短期開発のメリットを生かした多数機のコンステレーション運用により同一地点の頻繁な観測を実施できたり、個人や企業・研究機関などによるパーソナルユースの衛星が可能になったりすることにより、従来になく新しい衛星利用法や利用者の登場が期待される。コストは安くても数がでることにより、宇宙の産業化・商業化につながるとの期待もあり、宇宙開発における一つの新しいツールになりつつある。

千葉工大による2002年の鯨観測衛星の打ち上げ、東京大学、東京工業大学が2003年に打ち上げ成功した、「CubeSat」と呼ばれる世界最小の10cm立方、1kgの衛星XI-IVおよびCUTE-1を皮切りに、東京大学、東京工業大学がそれぞれ3機、北海道工業大学、日本大学、東北大学、香川大学、都立産業高専、創価大学、鹿児島大学、早稲田大学がそれぞれ1機の衛星の開発・打ち上げを行い、現在でも15を越える大学・高専での衛星作りが進んでいる。中でも東京工業大学のCUTE-1.7+APD（2006年打ち上げ）では、低エネルギーのガンマ線バーストの分布を観測するなど宇宙科学への応用面でも目覚ましい成果をあげ、また、東京大学のPRISMでは8.5kgの衛星では世界最高レベルの30mの地上分解能の画像取得に成功し、超小型衛星の地球観測分野への実利用に道を切り開いた。また、東京大学が現在開発中の位置天文衛星Nano-JASMINEは、姿勢安定度1秒角という大型衛星並みの姿勢制御能力により、位置天文分野で世界のトップサイエンスを目指すなど、50kg以下の衛星では日本が質・量ともに世界のトップを競っている。また、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、大学および中小企業の連携によりオールジャパン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ている。

これらの活動を通して、超小型衛星が宇宙工学、もの作りおよびプロジェクトマネジメント等に関して極めて効果的な教育の題材であること、同時に上記に述べたように、機能を多少犠牲にしてもコストや開発期間における大きなメリットを利用することで、実用化の期待も高いことを実感してきた。しかし、一方で、近年、大学等が適切な技術力アップのステップをやみくもに超小型衛星プロジェクトに走る傾向も否定できず、最近の大学・高専における超小型衛星の成功率の低下は今後我々大学・高専コミュニティが解決しなければならない大きな課題と言える。

明らかに言えることは、超小型衛星と一言で言っても、そのレベルや目的は様々であり、それに応じて適用すべき設計論、開発方針、必要とする基礎的素養、開発体制などは自ずと異なってくるのであるから、自分たちがどのような衛星を目指すのかを開発前に明確にし、それに応じた戦略を立てないといけないうことである。その検討が不十分であると、目指す衛星のレベルと実力のミスマッチが生じたり、目的がふらふらと開発途中で変わる衛星となったりし、それが成功率の低下につながるのである。また、過去に成功・失敗した経験をいたずらに広く敷衍して、他大学等のプロジェクトの進め方などを批判する人が出てきていることも事実である。特に、成功体験は時には「他の選択肢」があることに目をつむらせる危険性を有していると意識したい。一つの経験はあくまで実際に起こったある特定の状況のもとでそうであったというだけで、状況が変わればうまくいったやり方もうまくいかなかったり、逆であったり、アドバイスが的外れになったりすることもありうる。学問体系として整備するとは、それぞれの知見やそれを発展させた「理論」が、どのような状況であれば成り立つか（いわゆる「守備範囲」）、成り立たないかを明確にしていくことであり、その作業も本ジャーナルの大事な役割であると考えている。

本ジャーナルの一つの目的は、このような超小型衛星の設計論、開発プロセス論、体制論に関して、開発経験者がそれぞれのLessons Learnedを交換することで議論を戦わせ、学問体系として整備していくことにあると考えている。経験はただ一つの経験であるうちは、参考にはなるがあまり役に立たないケースが多いが、それを学問として体系化するということは、汎用化を図り、どこまでの守備

範囲を持つかを明確にし、今後開発を行おうとする人が教科書的に利用できるようにするよう整理していくことである。本論文では、そのような体系化の最初の一步として、まず、東京大学における開発の経緯を概観し、その中における著者の経験をもとに超小型衛星の意義と特徴を整理したのち、設計論・開発プロセス論・体制論に関連するいくつかの議論点を提示してみたい。今後、本ジャーナルに投稿される方のテーマ選定や議論の軸の参考になれば幸いである。

2. 東京大学における超小型衛星開発の歴史

2.1 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 350 ml のジュース缶の大きさの衛星を作り (例、図 1)、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) 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、2011 年には 12 大学、1 高校が参加し、ロケット 40 本以上を打ち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 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 4.5 m、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、2008 年に目標地点に到達 (0 m) している。東京大学をはじめ、多くの大学が CanSat で超小型衛星開発の技術力やプロジェクトマネジメント力を磨いてきており、軌道上衛星開発の前段階としての教育的効果の高いプログラムであり続けている。

2.2 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り、CANSAT と同様、スタンフォード大学の Twiggs 教授の発案である。教育が第一目的であるが、1.5~2 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、宇宙科学、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 2)。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慮しており、その第一歩として、アドバンスドミッションとして小型 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。

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いただいた。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、

ボディマウントにした。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。



図1 CANSAT の例 (2000年)

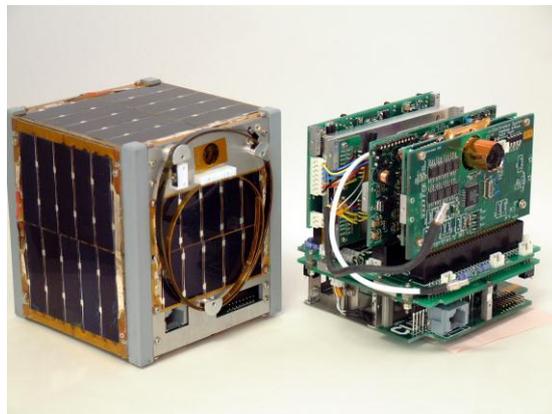


図2 XI-IV 外観と内部

軌道上の衛星を実現するための重要な技術として、特に以下のような点に注力した。

- ・低コスト、低電力の民生 CPU (8 bit PIC) を用いた OBC
- ・EEPROM を用いたオンボード記憶装置とその放射線耐性
- ・相互過電流監視回路による SEL/SEU 防御回路
- ・超小型アマチュア無線帯送受信機およびビーコン送信機
- ・リチウムイオン電池および充電回路
- ・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
- ・釣り糸によるアンテナ・ローンチロックとニクロム線による切断機構
- ・びっくり箱方式の CubeSat 用分離機構
- ・民生品主体の地上局設備の設置・運用



図3 XI-IV の取得画像

2003年6月30日、ロシアのロケット ROCKOT による打ち上げ後、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(図3など)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年にロシアのロケット COSMOS 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、頻繁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。

2.3 実用衛星へのステップアップ: 「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リモートセンシング(地球観測)機能を有する超小型衛星 PRISM の開発プロジェクトに着手した。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、特に、中・大型衛星が通常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った。目標地表分解能は概念検討の結果 30m と設定、このミッション達成のために、高性能な光学系のみならず、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 2008 年 12 月にフライトモデルが完成し (図 4)、2009 年 1 月、JAXA の H-IIA のピギーバック (GOSAT の相乗り) で軌道の上に打ち上げられ、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。S/N 比がまだ不十分であり、さらに鮮明な地上画像取得をめざして、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。

研究室の 4 機目の衛星 Nano-JASMINE は、国立天文台、京都大学、信州大学との共同開発による天文観測衛星である。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はほぼ同じ機能を、約 33 kg、コストも数百分の一の衛星で実現しようというチャレンジである。8 等星程度までの約 20 万個の星の三次元の正確な地図を作り、星の固有運動を調べることが目的の「位置天文」というサイエンス分野の衛星であり、特に暗い星を長い露光時間で撮像するために、非常に高い姿勢安定度が必要で、また光学望遠鏡 (ミッション系) の温度歪を防ぐために極めて高い温度安定度も必要とされた。4 年にわたる開発の中でさまざまな技術課題を解決し、2011 年現在、ほぼフライトモデル (図 5) が完成し、2012 年以降、ウクライナのロケット、サイクロン 4 によるブラジルでの打ち上げ準備を進めている。

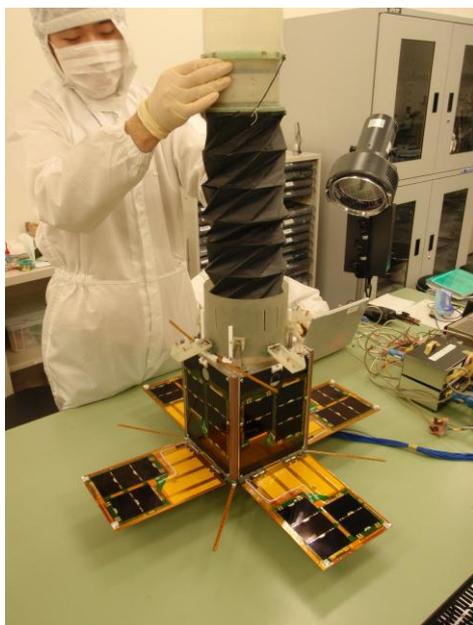


図 4 PRISM のフライトモデル

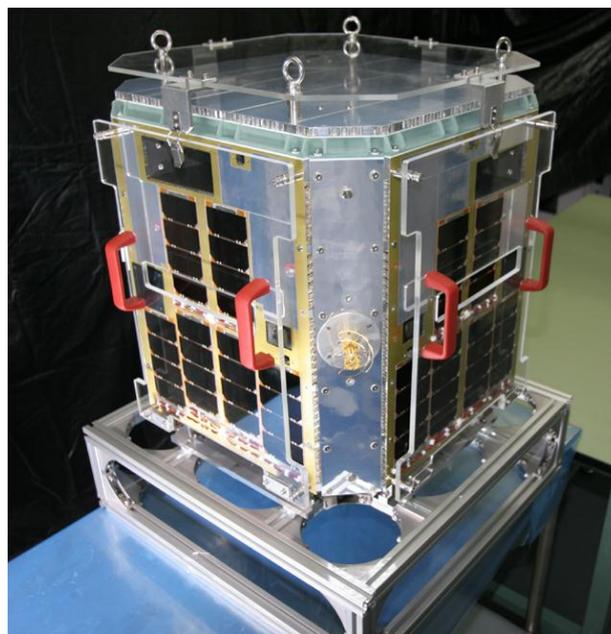


図 5 Nano-JASMINE のフライトモデル

2.4 超小型衛星実用化を目指す「ほどよしプロジェクト」

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 ヶ月の期間の中で、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 4 から 5 機の超小型衛星の開発・打ち上げをする予定である。

3. 超小型衛星の意義と特徴の整理

この章では、超小型衛星の意義と、それがどのような特徴からもたらされるのかを再度確認する。次章で提案する議論点においては、「このような意義をもたらす超小型衛星の特徴」を消さない、あるいはより強化するような方法論が重要であるという、一つの評価軸を提案する意味を持つ。

3.1 教育的意義

超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は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。

以上のように、超小型衛星が教育的に大きな意義を持つ理由を、以下の4点の優位性で整理してみよう。

3.1.1 「本物」であること

小さくて機能は低くてもきちんとした「衛星」であり、宇宙にまで打ち上げられるという点が重要である。それが以下のような効果を生む。

1) 宇宙に行くという意識が生む強いモチベーション

「自分の作ったシステムが宇宙に行く」という意識が学生に強烈なモチベーションを与える。つまり本気になるわけである。その「本気」は、絶対成功させたいという「真剣さ」につながり、その意識の元で各種の作業を深く考えながら実施することになるので、身につくこともより多くなる。

2) 宇宙環境という「現場」は中・大型衛星と変わらない

超小型衛星であってもその動作する環境は中・大型衛星と同じ厳しい宇宙であり、また、打ち上げ時の振動環境も同じものが与えられる。一番難しい「宇宙環境」は「一度打ち上げたらもう二度と修理できない」という点である。宇宙環境で生き残るシステムを作るために、環境試験は通常の衛星と同じように行なわなければならない（もちろん、程度の差はあるが）、また、非修理系であることから、軌道上で発生するあらゆる不具合要因を事前に想像し対策案を作っておかないといけない、という非常に厳しい開発を超小型衛星であっても経験することができる。

3.1.2 短期開発であること

1) 「開発期間が2～3年」の意義

2～3年という期間は、学生が通常研究室に4年生として所属して、修士課程を卒業するまでの時間であり、大事な教育である「学生がミッション検討、概念計画、設計、製造、試験、打ち上げ運用、結果解析まですべてを一貫して経験すること」が可能となる。その意味で、開発期間は打ち上げも含めて決して3年を超えてはならないというリミットがあると判断する。

2) 「繰り返し開発」の効果

一人ひとりの学生個人としては上記のように「開発が2～3年」というのは実質的な意味があるが、同時に、研究室としても、短期開発は「繰り返しの効果で技術力を短期にアップできる」、という効果がある。例として東京大学は2003年、2005年、2009年にあいついで衛星を打ち上げたが、経験を反映し、設計も徐々に高度化することで、信頼性を保ちつつ効果的な技術アップを図ることができた。次のプロジェクトがそんなに先ではないところにある、という意識は「今回の衛星ですべてを詰め込まなくても次で実験すればいい」という発想になり、それが無理のない、身の程の設計になる。それが成功の秘訣であり、技術力向上の最善の道だと考える。博士課程まで進んだ学生は2回以上の衛星開発を経験できる。そうすると、前回の失敗や反省を踏まえた開発を実践することができ、それによって、知見が「定着」するのである。そのようなことが可能であるためにも、開発期間は短くないといけない。

3.1.3 適度なサイズと複雑度、コストであること

1) 大学のラボで開発・試験できるサイズ

超小型衛星は大学の狭いスペースでも開発（特に衛星全体のインテグレーション）ができるサイズであることが強みである。逆に、これは大学の狭いスペース、試験機の限られた能力等からくる必須条件であろう。経験から言うと、それはおそらく50kg程度まで、「簡単なクレーンで運搬できる」重量程度であろう。また、試験機を十分に持たない大学は、さまざまな試験を外部の機関の試験機を借用して実施せざるを得ない。その際に、手軽にまた超低コストで手と車で運搬できるサイズ・重量が重要である。ちなみに、東京大学が二号機目の衛星XI-V（1kg）をインテグレーション先であるオランダのESTECに運搬したとき際には、「手荷物・機内持ち込み」で運搬した。これは器物の盗難、破損などが起こりにくい、また余計な運搬コストがかからない理想的な状態であり、超小型衛星のフットワークの軽さは大きなメリットである。大学衛星ではそのような常にコストミニマムでの開発という意識を持って開発を進めており、そこに、余計なコストを発生させて低コスト性を損なうことは、大学衛星のメリットを失わせることでもありひどい場合には開発にストップをかけてしまうものである。

2) 超小型はサイズだけでなく複雑度も「超小型」

中・大型衛星では、システムがあまりに複雑大規模システムであるがゆえに、コンポーネントを担当するものはその部分にしか目が行かず、衛星全体を見ながらサブシステムやコンポーネントの開発を実施することができない。企業の場合には仕方が無いが、教育目的で衛星開発にタッチする学生がいきなりそれをやったのでは、「なぜコンポーネントにその要求値が与えられるのか」が与えられた状態で設計・製造することになり、教育的な効果が弱まる。それに対し、超小型衛星は部品の点数も少なく（普通の衛星は部品30万点といわれるが、超小型衛星は数千点オーダーである）、サブシステム間のインターフェースもシンプルであることにより、全体を見ながらサブシステムを担当することが可能である。その結果、いわゆるシステム設計的な素養の鍛錬や、どのサブシステムに入っても対応できる汎用力を身につけることができる。

3) 大学でもまかなえる予算規模であること

部品の点数の少なさ、中庸な（最高性能を目指さない）機能・信頼性レベル、サイズの小ささ、そして短期開発性はそのまま低コスト性につながる。さらに言えば、労力の大半が学生であるということで、教育であるので賃金は払わない、という日本独自の指針から、超小型衛星は超低コストになる。

3.1.4 「顧客」「ユーザー」も大学・高専（学生や教員）であること

1) ミッション設定の自由度があること

大学での開発においては、たとえば理学系との連携があつてそこからミッションが来る場合（東工大のCUTE-1.7+APDのガンマー線バースト観測、東大のNano-JASMINEにおける位置天文学など）には、ミッションは外部から与えられる、つまり「顧客」が外部にあり、そこから与えられた仕様に基づき衛星を開発する。しかし、ほとんどのケースは、自身がユーザーであり、顧客であり、自らミッションを設定することができる。これは、開発する側のモチベーションを非常に高め、また研究室で研究

している成果や実験をミッションにできるので、論文にもつながりやすい、というメリットがある。もちろん、ユーザーが外にいないことは、外から開発費が来ないというデメリットはあるが、超小型衛星の持つ低コスト性から、その点は補われる。

2) 目標レベル、信頼度レベルも自身で設定できること

上記とも関連して、開発者が自分でミッションの設定が可能であることから、その目標レベル、信頼度レベルも自分たちの技術レベル・スキル・知見・経験を元に設定することができ、無理のない目標設定をすることができる。たとえば、軌道上で故障しても、そこで得られるものが大きければ、誰も困らないし、誰からも非難されない。そうだからこそ、思い切った実験ができ、革新的な技術を試せるのである。これが、大学衛星の最大の特徴であると考えられる。これを、十分な安全性、信頼性を要求していたのでは、大学衛星の意味の多くが失われると感じる。

これから導かれる極めて大事な視点は、上記の特徴を最大限生かすためには、自分たちの技術レベルやスキルを確実に把握することの重要性である。他の大学の成果や先輩の成果などを見ると、初心者が「自分たちもできる」と勘違いして、いたずらに難しいミッションや高い目標レベルを設定することがよくある。しかし、当然、そのレベルにまで技術が達していないのであるから、結果はうまくいかないことが多い。自分の技術レベルを自分で把握しながら、徐々に高めていくプロセスが重要なのである。

3.2 新しい技術・宇宙ビジネスの芽を培う土壌としての小型・超小型衛星

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研究開発し、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。

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。日本でもH-IIAによる相乗り打ち上げ制度がスタートしたが、アメリカでは、すでに1990年代からはるかに多くの機会が大学やベンチャーに提供され、それが活力を生んでいる。

小型衛星の開発においても、特に大学は、その自由な発想とフットワークの軽さ、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。

超小型衛星は宇宙の事業化・ビジネスの世界においても試行錯誤の格好の題材となるであろう。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 プロジェクトが数億円以下、開発期間も 2 年未満となれば、宇宙で新しいこと（ビジネス等）を試してみよう、と考える個人・企業が出てくるのが期待される。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られる。先に述べた「ほどよしプロジェクト」では「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、良い感触を得てきている。

4. 設計・開発プロセス・体制等における議論点

以上のような独自の目的と特徴を持った超小型衛星においては、その特徴を消さない、あるいはそれをさらに助長するために大型・中型衛星とは一線を画す戦略を持ち続けることが重要であると個人的には考えている。以下では「設計論」「開発プロセス」「開発体制」の三つにわけて、「どのような方法論が妥当か」「それはどのような状況で成り立つ理論か」という議論を展開する際のテーマを提案したい。衛星開発を経験された、あるいはされつつある大学・高専等から、それぞれのテーマに対する独自の方法論を提案いただき、それに対する賛同論・反論などを本ジャーナルの上で戦わせていきたいと考える。

4.1 超小型衛星の設計論における議論点

4.1.1 「死なない」衛星を如何に作るか？

衛星の生存は何よりも優先させなければならない課題である。それを確実なものとするために、以下のような技術分野・視点での新しいアイデアの提案と議論を期待したい。

1) リセット機構

超小型衛星では、電源系のダウンと電子系のハングアップがよく起こる死因と言われている。このうち、ハングアップは、リセット機構をしっかり作っておくことで防げる。たとえば、東大では軌道上での不具合の一回も起こっていない PIC16F877 などの低レベルで頑強な CPU を「神（絶対間違わない部分）」として搭載し、それが他の CPU を見はっておかしくなことが起こったらリセットをかける等の機構を搭載している。しかし、この CPU とて何らかの原因でハングアップしたり間違った判断をする可能性がゼロではないので、たとえば、他の CPU の 2 個が同時に「おかしい」と判断したらこの CPU をリセットする、あるいは、正常であったとしても週に 1 回はリセットをかける、などの最後の手段も用意する必要があるかもしれない。それも含めての検討が必要であろう。リセットをかけることは「機能の継続性」を犠牲にする。しかし、機能の継続性を維持するために通常の衛星で搭載している三重以上の冗長系による Voting という複雑な機構をつけなくてもよいことは、シンプル化とそれによる信頼性向上に大きな効果をもたらす。超小型衛星はリソースに限界があるので、このように、何かを犠牲にすることで何かを確保するという設計思想が重要である。

2) ロバストな電源系（特に太陽電力の確保）

電源系におけるトップ死因は、姿勢制御がうまくいかなくて、太陽電池で電力が発生できない状況と電源系（太陽電池、充放電制御回路、電力分配器等）自体の不具合である。海外の大学衛星では、姿勢制御を前提とした大きな太陽電池パドルを搭載した衛星が、姿勢制御系が正常動作しないためパドル型の太陽電池に太陽が当たらず、その結果バッテリーが枯渇して死にいたった例が多い。どんな姿勢状態になっても、最低限の電力は確保できることが大事で、そのためには、たとえば「回転は完全

には止まらないようにする」ことも一つの考え方で、それを実現するのに「1ホイールでバイアスモーメント状態にしておいて、何かあったらそのホイールを切ることで衛星が回転する」ことや「何かあったら微小電力を磁気トルカーに流して回転を誘起する」方策と、回転の軸（最終的には慣性モーメント最大の慣性主軸周りの回転になる）と太陽電池搭載面の関係をうまく設計することにより、太陽電力の発生を担保する方法論などが提案できる。こういった方策をいろいろ提案いただきたい。

また、電源系は Dead Battery（バッテリー電圧が極端に低い状態）からでも、太陽電力の充電で復帰できる設計を考えたい。打ち上げ時には、最終充電時からの時間の経過などで自己放電により、また、軌道上での何らかの問題で低電圧状態になるケースもあり、そこからの復帰は重要な技術課題である。また、バッテリーがだめでも、少なくとも太陽が当たっているときは運用ができるような電源系構成も最後のバックアップとして考えてみてほしい。

近年 PPT や MPPT などの太陽電池の最大電力発生点をソフト的にトラッキングして電力発生を最適化する方式が中大型衛星では行われているが、果たして超小型衛星で目指すべきかどうか、多少の最適化を犠牲にしても従来型のシャント回路方式の方がよいのではないかと、太陽電池の制御方式に関しても議論を期待したい。

3) センターライン（地上局→受信機→CPU）の確保

不具合が発生したときの最大の対応策は、アップリンクコマンドによる衛星内状態の変更である。地上の運用者、研究者、開発者はオンボードの自動機構にはるかに勝る叡智、機転と柔軟性を持っているので、その能力に賭けるというわけである。上記の1) や2) で当面すぐ死亡することを防ぎ、アップリンクコマンドを試行錯誤的に打ちながら、衛星を正常動作に戻していく自由度は絶対に確保したい。そのためには、地上局から打ったコマンドを確実に受信し、それを衛星内で展開するための「センターライン」の動作を確実に継続することが重要である。たとえば、東京大学の3号機 PRISM では、この受信機の制御 CPU として、軌道上実績を持ち、最も信頼性が高いと判断する PIC プロセッサを2機搭載し、どんな状況があっても受信機だけは絶対死なず、地上からのコマンド受信し、衛星内で展開できる構造になっている。

4) 衛星内の状況のダウンリンクの確実化

軌道上衛星でよく起こるのは、衛星が急に何も言っておかなくなって、何が起こったかわからない、対応のしようがない状態になるケースである。そのために、低レートでもいいので、健康状態を確実にダウンリンクできるラインを確保しておくことは大事であろう。東大の1, 2号機の CubeSat や3号機 PRISM では CW ビーコン (80mW の UHF 送信) と FM パケットの送信が冗長系になっており、またそれらを制御する CPU も PIC をそれぞれに配置することにより、いずれかが生き残れば、ある程度の衛星内情報がダウンリンクされる構成になっている。深宇宙探査機の「のぞみ」や「はやぶさ」では、衛星に不具合が起こった時に、ローゲインアンテナを使った「1ビット送信」により、内部状態を根気よく把握していったことはよく知られている。特に3) で述べたアップリンクを確実にできる能力と合わせることで、衛星を復活させる可能性は飛躍的に高まるのである。

4.1.2 生き残った衛星の機能を再構成する方策

1) 軌道上再構成の自由度

上記で最低死なない状態は確保できても、ミッションが実現できなければ死んだも同然である。したがって、問題発生後に、如何にシステムを再構成して、ミッションを100%といえなくてもある程度実施できるようにするかを考える必要がある。まずは衛星上にそれだけの再構成の自由度を如何にインプリメントできるか、が重要である。超小型衛星の厳しい点の一つはサイズ・重量・電力等のリソースが極めて限られており、単純冗長はできないことにある。したがって、もとは別の機能を果たしていたものを、いざという時に壊れたシステムの肩代わりをさせるような「機能冗長」が望ましい。その新しい方法論の提案や議論を期待したい。

また、このような構成を地上からのコマンドやプログラムアップロードで如何に変えられるか、その方法論も重要な課題である。よく用いられるのは、プログラムアップロード機能。アップリンクの速度が遅い超小型衛星で、如何に効率よくプログラムをアップロードし、その動作を保証できるかに、新しいアイデアを期待したい。また、CPU の能力やメモリ量に多少の余裕がある場合には、たとえば、

細切れのプログラム（特定の機能を果たす関数）を、使わない可能性の高いものも含めて事前にプログラムし、その動作シーケンスをパラメータを変えることで制御する仕組みを用意しておくことにより、コマンドアップリンクだけで機能の再構成をするという方式もありうるだろう。ソフトウェアのアーキテクチャと合わせて新しいアイデアを期待したい。

4.1.3 超小型サイズならではの構造設計

たとえば、1kg、10cm 立方の CubeSat では、構造設計が非常に楽になることは明かである。衛星自体やパネルのサイズが小さくなることで固有周波数は飛躍的に大きくなり、また座屈強度はサイズの 3 乗程度に反比例して大きくなるので、極めてシンプルな構造が可能となる。50 cm 立方クラスのマイクロサットではさすがにもう少し構造設計は厳しくなるが、それでも一辺が数 m クラスの中・大型衛星と比べるとはるかに構造設計は楽になる。たとえば、筆者の経験では、50 cm 立方クラスが、ちょうどパネルにアルミ板を使うかハニカム板を使うかの境目になるイメージであり、それより小さい衛星では、安価で設計・組み立てしやすいアルミ板を利用するのが得策である。さらに言うと、一体削り出しではなく、はるかに安価な板金加工の構体パネルも可能になるであろう。つまり、構造設計が楽になることをいかして、如何にシンプルで低コスト・組み立てしやすい構造を設計するか、超小型衛星のメリットいかした構体コンセプトの提案を期待したい。

4.1.4 超小型衛星の熱設計

1) 超小型衛星の特徴を生かした熱設計

超小型衛星の熱設計も、その超小型サイズを生かしたい。メリットとしては、機器やパネルがそばにあるので、温度の均一化を図りやすい点あげられる。たとえば、衛星内の機器やパネルの熱結合（主として伝熱による）を徹底的に強化して、熱設計における節点を、衛星外面が 1 節点、衛星内部が 1 節点になるような熱設計が理想的であると考え。衛星全体の平均温度の履歴は、内部発熱と太陽にあたる表面積の時間変化によってその変化プロファイルがおおまかに決まり、それが一つの設計の自由度となる。内部で温度分布が生じると、その平均プロファイルから上ないし下にずれて温度変化する節点が生じるということであり、その節点は、平均温度よりは熱的にはさらに厳しくなることが多い。つまり、節点数が少ない方が、その平均温度のプロファイルからの乖離は少なく、熱的にはより楽になると言える。また、このような衛星は熱試験も楽で、熱真空試験も必要ないかもしれない。また、一時的な熱の入力を「蓄熱材」で吸収し、温度の時間変化・場所による変化を小さくするという方法論もあり、超小型衛星との親和性を議論したい。

2) 超小型衛星の制約からくる熱設計における課題

逆に超小型衛星の持つ「負の特徴」から熱設計が厳しくなることも考慮しなくてはならない。第一に、「太陽熱入力や発電量（＝衛星内部熱発生量）を決める表面積」に対する「熱容量を決める体積ないし重量」の比は、当然衛星サイズが小さくなるとニアに小さくなり、温度変化は起こりやすくなる。第二に、打ち上げ軌道はピギーバック打ち上げの場合は自分で選べないので、打ち上げ便が決まらなると決定しない。したがって、たとえば、衛星の完成の 2 年前に打ち上げロケットが決まるという典型的なケースでは、完成の 2 年以上前には熱設計の境界条件が規定できないのである。したがって、どのような衛星軌道になっても対応できる、あるいは簡単に修正できる熱設計の方法論が要請される。第三に、ロケットからの分離時の温度条件がなかなか決まらない、あるいは非常に広い温度範囲の条件が与えられ、それに耐えうる熱設計が要求される。以前 UNISEC で開発して打ち上げた深宇宙探査機 UNITEC-1 では、 -25°C ～ 50°C 程度の極めて幅広い分離時の温度境界条件が与えられた。これは、ロケットが開頭し、放射冷却が始まった状態で、メインの衛星の陰などに超小型衛星が入った状態が長続きすると、切り離す際には極低温になる可能性があるからである。極低温からのスタートでは、特にバッテリーからの電力供給ができるかという問題が発生する。リチウムイオン電池、Ni-MH 電池共に -20 度近辺になると急激に電力がでにくくなり、内部抵抗も増大する。この段階でマイクロスイッチが ON になって電力を無理やり引き出そうとすると、バッテリーに修復不能なダメージを与える可能性がある。それへの対策も重要であろう。

4.1.5 それ以外の技術課題

以上以外にも、以下のような「超小型衛星特有」の技術課題があり、それらへの様々な方法論・技術の提案と議論を期待したい。

1) 各種の展開機構

「小さな衛星を軌道上で大きく使う」は超小型衛星の利用をさらに拡大する重要な技術であり、太陽電池パドル、アンテナ（たとえば、フェーズドアレイアンテナ用の展開式フラットパネルアンテナ、パラボラアンテナの整形など）、伸展機構（東大のリモセン衛星 PRISM の光学望遠鏡、ドイツの TUBESAT の伸展式光学系、磁気センサー用ブームなど）、デブリ化防止のための膜や風船展開機構、EDT (Electric Dynamic Tether) のためのテザーの展開機構など種々の応用例があるだろう。新しい方式の提案を期待したい。

2) 超小型衛星に適した推進系

軌道制御は衛星の効用をさらに高める重要な技術であるが、超小型衛星のリソース制約から搭載が困難であるケースが多い。しかし、先のほどよしプロジェクトではその1号機に H_2O_2 の推進系を搭載し、3号機以降はイオン推進を搭載する予定であるなど、50kg 級衛星でも推進系の搭載が始まっている。また、大阪工大ではさらに小さな衛星に電気推進をミッション系として搭載し実験する計画が進んでいる。超小型衛星のリソース制約にマッチした推進系の在り方の議論が待たれる。

3) 超小型衛星における通信技術のあり方

各種の光学機器（可視望遠鏡やボロメータ）、宇宙科学・地球観測用機器の発達により、オンボードで大量のデータの発生をもたらすミッションが比較的超小型衛星のリソース制約の中でも容易にできるようになってきた。その際に最もボトルネックとなりやすいのが、ダウンリンクの容量であり、通信系をボトルネックにしないための超小型衛星なりの通信系の将来像を検討する必要がある。一つは従来の RF 通信の小型高機能化であり、一つは光通信技術の超小型化である。いずれも先の「ほどよしプロジェクト」で検討を進めており、達成した技術の報告を期待したい。

4.2 超小型衛星の開発プロセスにおける議論点

4.2.1 超小型衛星にあった試験手法

超小型衛星では、中大型衛星と全く同じ地上試験をしていたのでは、コストは莫大になり開発期間も長期化する。特にすべての試験設備を保有していない機関が作る際には、特にこのことは顕著となる。したがって、超小型衛星の特徴を生かし、「やらなくてもいい試験」あるいは「解析で予想がつく試験」を同定し、「できるだけ試験をさぼる」方法論を構築すべきであろう。幸い、先にのべた「ほどよしプロジェクト」では、九州工業大学に試験設備を集結し、そこでの各種試験の結果をもとに、超小型衛星に必要な試験の見極めと標準化の検討を実施してもらっている。その成果をベースにこのジャーナルで議論していきたい。

たとえば、熱真空試験をすべきかどうか、は議論が分かれるところである。特に、外面同志および内部の熱結合を強くして、外面を節点1、内部を節点1に近似できる熱設計を施した衛星は、非常に温度予想がしやすくなり、熱設計の必要性は減じるだろう。熱真空試験は、真空下で温度が低温から高温まで変化することに機器が耐えるかどうかの確認に必要である。ただし、それは、機器単位で小型の熱真空試験装置でも事足りる。衝撃試験に関しても、JAXA の H-IIA、ドニエプルロケットから要請される衝撃条件を作り出せる衝撃試験装置が見つからず困ったケースがあった。どのような条件で衝撃試験をやっておけば安心できるか、またそれをどう試験するか、議論を期待したい。それ以外でも、超小型衛星の短期開発と相性が悪い長期の寿命試験を必要とするもの、たとえば、バッテリーの充放電サイクル試験、駆動部（モーターなど）の長期動作試験などをどうするか、機器や衛星全体のバーインをどうするか、など短期間の開発の中での効率的な試験の実施手法の検討も重要であろう。

4.2.2 放射線試験の考え方

地上試験の中で最もコストがかかり、どうやるかが明確でないのが放射線試験であろう。特にコストの制約から、必要なシングルイベント試験、トータルドーズ試験をすべて実施することはできないケースが多く、実施するにしても必要なものだけを如何に安く、効果的に実施するかを検討すること

は意義がある。また、それぞれの開発機関がどのような試験を実施し、また軌道上でどのようなパフォーマンスだったかの「相関データ」をこのジャーナルの上で交流することで、コミュニティ全体で知見を醸成していきたい。

トータルドーズ試験は、大学や地方自治体の持つ設備で比較的安価にできるケースが多く、あまり問題にはならない。一方で、シングルイベント試験は機会・コストの面で難しいケースが多い。東大 CubeSat 開発のころは、JAXA の設備をお借りして実施したが、そこで行った、カリフォニウムからの重粒子イオン照射で発生するシングルイベントの回数をもとに、CREME というソフトで軌道上での発生回数予想を行う方法が最も簡便で低コストであった。現在、京都大学の熊取原子力施設に、先の「ほどよしプロジェクト」の資金でカリフォニウム試験設備を構築中で、そこでの試験がまずは第一段階の粗い推定には利用できる。さらに精度の高い予想のためには、高崎の日本原子力研究開発機構の設備を使うか、放射線医学総合研究所の設備を利用するかであるが、照射できる粒子が異なり、軌道上での放射線現象との相関が高く、かつより低コストでできる方法は何かを同定する必要がある。また、まだ衛星用試験に使ってはいない放射線発生設備を持つ機関の情報や、実際に試験を実施した機関の報告などもこのジャーナル上で交換したい。

4.2.3 どこまで「深く」開発するかの考え方

東大の初期の CubeSat の時代は、超小型衛星用機器もなく、あったとしてもそれを購入できる資金がなかったので、ほとんどの搭載機器を手作りした。一方で、平成 21 年度の文科省の超小型衛星プロジェクトにおいては、非常に大きな資金が与えられた結果、機器を購入するか、外注を行うケースが圧倒的に増えた。前者では、教育的効果は最大であるが、時間はかかり、かつすべての機器が独自開発であるために軌道上実績はなくリスクも高い。後者はリスクは少なく開発期間は短縮できるが、当然コストは高くなり、かつ AI&T (Assembly, Integration and Test) がメインの開発作業となり、得られる教育的効果もそれが中心となる。もちろんこの二つの極端なケースの間に、さまざまなグラデーションがあるだろうし、どの方式がいいか悪いかの議論は不毛である。

大事なことは、それぞれの開発機関ごとに、今やろうとしている衛星プロジェクトで何を指すか（教育なのか、技術実証なのか、実用なのか、など）を明確にし、また自分の技術レベルと懐具合を勘案して開発方針を決定した上で開発を進める必要がある点である。現在の様々な大学での衛星計画を見ていると、その最初の検討が不十分で、開発途中にふらふらとフィロソフィがずれていくケースも見られ、あまりいい傾向とは言えない。たとえば、衛星開発を経験した機関が自分たちの開発を振り返って、どのようなフィロソフィを立てて開発に臨んだか、途中でそれがどうなったか、その結果がどうなったか、を自己評価し、それぞれのレベルの開発において、その効果を最大にするにはどのような開発方式がよいか（よかったか）を議論することを期待したい。

4.2.4 ソフトウェア開発の考え方

超小型衛星用機器の整備が今後進むと思われる、標準的な機器はほぼ手に入る時代は近い。そうなった場合に重要な開発項目は、ミッション系と、そのミッションを実施するためにそれらの機器を如何に組み合わせ、動作をカスタマイズするかを制御するソフトウェアとなるであろう。つまり、今後ますますソフトウェア開発に占める比重が高くなるということである。

現在では、多くの機関がそれぞれの流儀でソフトウェアをゼロから、あるいは一つ前の衛星開発をベースに開発しているケースがほとんどであろう。この方式は明らかに効率は悪い。ソフトウェアをできるだけリユースする方法論、あるいは、異なる開発機関の間でソフトウェアを標準化し、他の機関の成果を自分の衛星にカスタマイズする方法論が望まれる。宇宙環境のシミュレーション・ソフトウェアなども標準化は可能であり、我々のコミュニティでそれを整備し、皆でその成果を共有する活動を本ジャーナルを拠点に進めてはどうだろうか考える。

さらに高度な技術として、ハードウェアとソフトウェアを共存させて試験環境を作り出す考え方（HIL: Hardware in the Loop 試験）により、開発した機器を早い機会に End-to-end に近い試験を実施させる方式や、衛星オンボードソフトウェアに必要な様々な機能をライブラリ化し、それらを部品のように組み合わせるオンボードソフトウェアを構築する手法、さらには、オンボードソフトウェアをフレームワーク化し、開発の手間と誤謬を減じる方法論など、さまざまな技術が各大学で研究されているはずで（東大でも実施している）、それらを本ジャーナル上で紹介いただき、議論を誘

発していただきたいと考える。

4.3 超小型衛星の開発体制における議論点

4.3.1 衛星のレベル設定について

設定するミッションの高度さとそれに付随する衛星システムの複雑度、要求される技術レベルの設定は、上記に述べたように、開発者側が自身で設定できることが超小型衛星の大きな特徴である。それはメリットにもなるが、逆に設定を高くしすぎて無理な開発になり、教育効果が減じられるケースも多々見られる。その理由としては、ア) 他の大学などがやっているのを見て「できる」と思ってしまふ、イ) 同じ大学内でシリーズ化した場合、前に作った衛星よりもレベルが上でないとモチベーションがわからない、ウ) 自分の技術レベルについて誤った感覚を持っている、エ) 衛星作りに必要な考慮点がきっちり理解されえおらず、単なる「電気工作の延長線上」であると思っている、などがよく見られる原因である。これは、超小型衛星の登竜門的な実験モデルである CANSAT でもよく見られる光景であり、CANSAT の成功率が近年頭打ちしている理由である。先輩がやったところ以上のものを目指して難しい CANSAT を狙うのだが、実際に開発にタッチするのは、「先輩」と同じ経験はつんでいない初心者であり、そのギャップが失敗につながるのである。この問題をどう解決し、適正なレベルの目標設定をするか、その方策についての議論を期待したい。

4.3.2 開発時点で持つべき素養

上記の課題とも関連するが、衛星開発をスタートする時点で（あるいは、開発途中の早い段階で）獲得しておくべき基礎的素養としてどのようなものがあるかを整理しておく必要がある。それぞれのコンポーネント（通信機器、OBC、姿勢制御機器等）を購入したからと言っても、その中身や動作原理を十分知らないとシステム設計はできない。ではどのレベルまでのことを知っておけばよいか、については明確なガイドラインはなく、必要なレベルの知識もなく開発を進めているケースがないとはいえないだろう。各要素技術はまだわかりやすいが、では、プロジェクトマネージャーやシステム設計担当者（同一者が実施するケースが多いが）に要求される素養は何か、何を知っていればよいかは、さらに定義が難しい。これを知っていなかったばかりに、こんな苦勞をした、などの Lessons Learned を交換し、我々のコミュニティで共有できるガイドラインを整備していきたい。

4.3.3 学生が実施する作業の範囲について(分業の在り方)

もう一つの大きな問題は、衛星作りにおいては、研究に近い最先端的な開発部分もあれば、最先端ではないので研究要素は無いが、確実に開発しないといけないような部分（電源系などが典型例）が混在している。また、環境試験、半田付けと回路の信頼性維持などには莫大な労力が必要であり、あまり教育的効果がないような単純な労働作業も多々ある。研究室内だけで開発する場合は、そのような作業も含めてすべてを自前で実施しないといけない。衛星のレベルが向上すると、そのような必要労力も莫大になってくることは、多くの大学で経験していることであろう。もちろん、上記の作業自体が教育になることは確かであるが、あまりにそこに時間が取られすぎて、本来やるべき研究的な検討ができないのが現状である。また、上記の労力を削るために作業を外注することは可能であろうが、外注の範囲が広がると超小型衛星の持つ低コスト性が損なわれてしまう。この傾向は、衛星を何機か開発してどんどん高いレベルの衛星を目指すようになった大学に顕著な傾向である。

理想的には、かつての大学における「技官」のような専門性と高い技術力を持った方にメンターとして入ってもらい、開発時にさまざまな知見をトランスファーしていただくとともに、上記のような単純労働でもお手伝いいただくことが一つの解となる。この問題に対しての各開発機関なりの考え方を紹介いただきたいと考える。

4.3.4 複数大学による共同開発

衛星のレベルが高度化して、技術面での検討事項が増えると、すべてを一つの大学・高専で開発することは学生の労力の大きな負担を招くことは前節でも述べたとおりである。一方で、より高いレベルの衛星を開発したいという欲求は、すでに衛星で成功した大学・高専であれば、必ず持つであろう。この二つの相反する要求条件を両立させる一つの道は、各大学・高専の1機目はそれぞれの大学・高専単独で開発するも、2機目以降は複数の大学・高専で共同で開発するというモデルである。UNISEC

の22大学の共同で開発を進め、2010年に打ち上げたUNITEC-1はその一例である。そこでは、さまざまなLessons Learnedが得られた。この知見などをベースに、複数大学での共同開発のメリット・デメリットは何か、メリットを最大化し、デメリットを消す方法は何かをぜひ議論したい。

4.3.5 大学・高専等における技術トランスファーの方法論

入れ替わりの激しい大学や高専において、獲得した知識、経験、知見、ノウハウを如何に上級生から新入生に伝えていき、研究室の中にそれらが蓄積されていくようにすることは重要な課題である。現在も問題意識を持った大学・高専ではすでにそれぞれなりに工夫がされている。たとえば東京大学では、航空宇宙工学科に入ったばかりの2年生冬学期の学生に筆者の研究室の学生が自主的に電子回路研修を施して、基礎の素養を与え、3年生の筆者担当の講義の中でCANSATを使ったさらにアドバンストな鍛錬を行い、ある程度、経験・知見をもった学生が研究室に4年生となって入ってくるようにしている。研究室に入ってからはずぐに衛星プロジェクトに入ってもらい、あとはOJT(On the Job Training)方式で鍛錬を進め、上級生になると各系のサブシステムリーダーを務め、さらにそれを経てプロジェクトマネージャーになるような仕組みを作っている。各大学・高専における、そのような方法論や経験をぜひ本ジャーナルで紹介していただき、他の大学・高専の一つの見本となっていればと考える。

5. おわりに

本論文では、まず東京大学における開発の歴史を簡単に紹介し、それを踏まえ、超小型衛星の意義と特徴を整理したのち、超小型衛星の設計や開発プロセスにおける議論すべき点を概括した。それぞれの問いかけに対して、あえて答えを記載してはいない。答えは一つではなく、さまざまな方法論があり得るだろう。ここに書かれた議論点の提案を一つの参考に、今後、本ジャーナルにそれぞれの機関流の提案を論文として投稿していただき、それがきっかけとなって、ホットな議論が巻き起こることを期待したい。その議論の結果、超小型衛星の開発という分野が一つの学問体系として整備されていくことを切に願っている。

謝辞

本研究は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。

参考文献

- [1] 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, VOL.J88-B No.1(2005) 41.
- [2] 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
- [3] Shinichi Nakasuka, Students' Challenges towards New Frontier -Enlarging Activities of UNISEC and Japanese Universities, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan*, Vol.7, No.ISTS26, pp.To19-24, 2009
- [4] Shinichi Nakasuka, Evolution from Education to Practical Use in University of Tokyo's Nano-Satellite Activities, *Acta Astronautica*, 66 (7), p.1099-1105, Apr 2010
- [5] S.Nakasuka, Micro Satellite and Space Education, *Journal of Space Technology and Science*, Vol.16, No.1, pp.1-8, 2000