

BIRDS プログラム デジタル 教科書

文章番号: CubeSTD-2019-001F



金相均 前田丈二 趙孟佑

宇宙環境技術ラボトリー

九州工業大学

2019

目次

1. はじめに	6
2.キューブサットによるキャパシティビルディング	9
3.キューブサットシステム	12
a.宇宙セグメント.....	12
b.地上セグメント	12
c.データ分析セグメント.....	12
4.システムエンジニアリングとプロジェクトマネジメント	13
a.システムエンジニアリングの概要	13
b.ミッションの定義.....	13
c.要求管理.....	13
d.作業分担	14
e.リスク管理.....	14
f.故障モード影響解析と故障の木解析	14
g.検証と確認.....	15
5.宇宙セグメント	16
a.電氣的仕様.....	16
b. 機械的仕様.....	30
c.バス部とミッション機器間のインターフェース	34
d.システム統合	35
6.地上セグメント	37
7.データ分析セグメント	43
エラーの検出と修正.....	43
データ統合	43
データ解析	44
8.衛星運用	45
9.国際周波数調整と無線免許.....	49
10.打ち上げと軌道上環境	54
打ち上げ環境.....	54
軌道環境	57
11.組み立て、統合、試験	59
a.組み立て.....	59
b.統合.....	60
c.試験戦略.....	61
12.安全	72
13.異文化横断とキャパシティビルディングの側面.....	79

14.持続可能な教育プログラムとしての実施.....	85
15.結論	87

略語集

BAT	Battery
BCR	Battery Charging Regulator
BPB	Back Plane Board
BW	Band Width
COM	Communication system
CubeSat	Cube Satellite
DNST	Doctorate in Nano-Satellite Technology
EPS	Electrical Power System
EPS/OBC	EPS OBC board
FAB	Front Access board
FM	Flash Memory
Kyutech	Kyushu Institute of Technology
ISS	International Space Station
OBC	On Board Computer
PCB	Printed Circuit Board
PIC	PIC microprocessor
PNST	Post-graduate study on Nano-Satellite Technology
RAB	Rear Access Board
RBF	Remove Before Flight pin
SC	Solar Cell
SEIC	Space Engineering International Course
SHM	Space Head Module
SRB	Solid Rocket Booster
STR	Structure system
TRX	Transceiver
UHF	Ultra-High Frequency
UNOOSA	United Nations Office of Outer Space Affairs
1U	1 Unit size, 10 [cm] x 10 [cm] x 10 [cm]

1. はじめに

キューブサットは標準的なユニットの立方体で構成される小型衛星の一種である。1つのキューブサットのユニット(U)は $100\times 100\times 100$ [mm]であり、最小の1U キューブサットは、質量が1.33kg未満の非常に小さな衛星である。元来キューブサットはそのサイズの小ささ、軽量さ、予算の少なさによって宇宙工学技術の教育ツールとして提案されたものである。最初のキューブサットは2003年の6月に打ち上げられ、軌道上でその機能を首尾よく論証した。この成功は、宇宙業界に大きな衝撃を与えた。2012年から2017年をとおして700機以上のキューブサットが打ち上げられ、その数は急速に増加している。NASAのような宇宙機関はキューブサットを様々なミッションに使用しており深宇宙探査も行っている。現在、多くのキューブサットプロジェクトが、リモートセンシングやコミュニケーション、科学的な研究を目的として行われている。

費用の少なさや開発期間の短さといったキューブサットの強みは主にリスクの高い取り組み、小規模な開発チーム、市販製品(COTS)を積極的に使用することによるものである。それは国際宇宙航行アカデミー(IAA)の調査専門委員会[1-1]で近年提唱された”lean satellite”をよく表すものである。キューブサットはその放出方法や外側の機械的な寸法に明確な基準がある。その基準は打ち上げとの互換性に利点をもたらし、打ち上げの機会を大幅に増やすことに成功した。そのおかげで3Uのキューブサットのコンステレーションが現実のものとなった。この3Uのキューブサットのコンステレーションはすでにリモートセンシングビジネスに利用されている。しかしキューブサットはビジネス目的だけではなく元来提案されていた教育目的を満たす非常に重要なでもある。とりわけ多くの発展途上国や新興国で、キューブサットをもちいて宇宙技術の能力を構築する(キャパシティビルディング)試みがなされている。

九州工業大学(Kyutech)は2015年からBIRDSプログラムを実行している。このプログラムでは、各世代のBIRDSプロジェクトが毎年10月に開始される。それぞれのプロジェクトでは経験のない学生がトレーニングを受け複数の1Uのキューブサットを開発する。2019年3月時点でBIRDS-1、BIRDS-2、BIRDS-3、BIRDS-4と4世代のBIRDSプロジェクトが実施された。BIRDSプログラムは従来の宇宙技術だけでなくシステムエンジニアリング、プロジェクトマネジメント、異文化間の共同作業を学ぶ素晴らしい機会が得られる特異な教育プログラムである。文部科学省の平成31年度地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として「国際協働衛星プロジェクトの実践を通じた、世界に通用する宇宙人材の育成」が採択された。この資金援助を受けて、筆者らはBIRDSプログラムを大学高学年の学生から博士課程の学生までの教育カリキュラムの一環として実施することが可能な持続可能な教育プログラムとすることを目指している。そのために筆者らは(1)計画にかかる費用を減らすこと、(2)教員の負担を減らすこと、(3)参加学生を増やすことについて研究している。本書は他の大学がBIRDSプログラムと同様に持続可能な方法で教育プログラムを開始できるようにするための上記委託事業の一環として作られたものである。

BIRDS プログラムのように持続可能な計画を作成するにあたって最大の問題となるのは計画にかかる費用の削減である。衛星の開発には莫大な費用がかかる。衛星プロジェクトの世代毎に、衛星バスは衛星ミッションの目的に適合するように変更される。衛星のバスの小さな変更でさえ莫大な費用がかかる。衛星の費用を削減するためそれぞれの世代の衛星プロジェクトが修正することなく同じバスを使うことができるように衛星バスの標準化を試みた。その結果、ハードウェアのコストを最小化することができた。本書の特定の目標の1つは標準的なバスのシステム、特に電氣的な設計について紹介することである。筆者らはそれを BIRDS バスと呼んでいる。

標準化はいかなる衛星プログラムにおいても費用を削減し開発効率を高めるために重要な問題である。キューブサットの電気設計のために多くの研究者が適切な標準を構築しようと試みている。時には、サブシステム間の標準化されたインターフェースは、それ自体が柔軟で効率的な開発のためのプラグアンドプレイシステムを目的とした研究テーマともなる。異なるキューブサットプロジェクトで同じ衛星バスの設計を用いる場合、ある程度のリソースの浪費は避けられない。キューブサットは多くの面でリソースが限られている。例えば限られた質量や大きさ、極端に低い発電量である。少しのリソースの無駄でさえミッション目的の達成を不可能にする。標準のキューブサットバスシステムは最小限の追加リソースで異なるミッションに対応できるよう十分に柔軟なものでなければならない。

BIRDS バスは BIRDS プログラムを支えるキューブサットバスの標準的電気設計である。各 BIRDS プロジェクトでは宇宙開発経験のない国のキャパシティビルディングのために1Uのキューブサットを開発する。各プロジェクトでは多数のキューブサットを1年で開発することを求められる。それが BIRDS プログラムの主な利点の1つであるが、経験の浅い学生には大きな負担がかかる。チームメンバーは衛星開発の経験がほとんどないので標準化されたキューブサットのバス設計は学生メンバーの迅速なトレーニングにおいて非常に重要になる。トレーニングのために参考となる設計が必要であり、それは非常に明確で理解しやすいものでなければならない。また、迅速なトレーニングにより、搭載ミッションの開発に多くのリソースを割り当てることが可能となる。BIRDS バスは教育用のキューブサットプロジェクトの標準バスとしての設計という特定の目標があり、標準として提案されている他のキューブサットバスとは異なるいくつかの特性がある。パフォーマンス、効率、柔軟性は通常標準バス設計にとって重要な要素である。それらも BIRDS バスの目標である。しかし BIRDS バスの設計では初心者が簡単に学べ、使用することができることに重点が置かれている。例えば、BIRDS バスは効率のためだけでなく簡単な作業の共有や単純なコーディング作業のために分散システム設計を使用している。また BIRDS バスはプロジェクトで不必要な遅れを避けるために追加の作業なしに安全要求を満たす必要がある。

本書のもう一つの目的はキューブサットシステムの基本を解説することである。キューブサットプロジェクトの初心者は、様々な背景をもっている。彼らはしばしば CubeSat システムの基本的な知識さえ持っていない。本書は基本的な知識を素早く得られるようにキ

キューブサットの基本的な情報を含んでいる。

第 2 章ではキューブサットプロジェクトがキャパシティビルディングのための教育プロジェクトとしてどのように機能するかを示している。具体的には宇宙新興国向けのキャパシティビルディングプロジェクトの例として BIRDS プロジェクトが紹介されている。第 3 章ではキューブサットシステムの概要について解説し、第 4 章から第 6 章で詳細を解説する。キューブサットが軌道上に投入されたとしても衛星プロジェクトは完了しない。衛星の運用は続いているので第 7 章ではキューブサットの運用について解説する。周波数免許の取得は、衛星の増加に伴い需要が非常に高まっているため非常に困難な作業となっている。第 8 章では UHF アマチュア無線帯域を例に周波数免許の取得手順について解説する。第 9 章と第 10 章では打ち上げ環境、軌道環境、環境試験について解説する。第 11 章では組み立て段階と統合段階に関する重要なポイントを示し主要な試験について解説する。第 12 章では安全要求とそれが満たされているかを確認する方法について解説する。筆者らはキューブサットが国際宇宙ステーション(ISS)から放出されることを想定している。第 13 章では BIRDS プロジェクトの異文化及びキャパシティビルディングの側面について解説する。第 14 章では教員への過大な負荷や多額の予算投入なしに持続可能な教育プログラムとして大学で衛星プロジェクトを実行する方法を検討する。第 15 章は最後の章として本書の結論を述べる。

参考文献

[1-1] M. Cho and F. Graziani, “Definition and Requirements of Small Satellites Seeking Low-Cost and Fast-Delivery”, [I International Academy of Astronautics \(IAA\)](#), February 2017.

2. キューブサットによるキャパシティビルディング

発展途上国/新興国の間では小型衛星の開発を通じて宇宙技術の能力を構築するための人材育成(Human Resource Development, HRD)が強く求められている。宇宙先進国の宇宙機関、企業、大学が実施した様々な HRD プログラムがある。最も著名で成功したものは Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL)[1]が実施したものである。SSTL はサリー大学と共同で韓国、ポルトガル、チリ、アルジェリアなど様々な国から技術者を受け入れ、これらの国の最初の衛星の実現に貢献した。しかし 2000 年代に HRD プログラムが宇宙機関や大型衛星の販売に紐付けした大企業によって実施されると多くが失敗に終わった。考えられる理由は衛星を実際に開発する機会がないこと、衛星プロジェクトの開発過程のプロセス全体に参加できないことである。また人的資源がトレーニングを通して開発できても国の宇宙プログラムが持続可能なものではなく、多くの有能な技術者が宇宙部門を去っている。宇宙開発の能力を構築するための HRD の成功には次の 2 つのポイントがある。

1. ミッションの定義から運用まで衛星プロジェクトの全サイクルを実際に体験すること。
2. トレーニング終了後の持続可能性のため戦略を立てること。

九州工業大学は宇宙新興国の宇宙開発能力向上を促進するための長期奨学金プログラムである DNST/PNST(Doctorate in NanoSatellite Technology/ Postgraduate study in NanoSatellite Technology)を 2011 年に国際連合宇宙部 (United Nations Office of Outer Space Affairs, UNOOSA)と共同で開始した。また、プログラムを提供する大学院カリキュラムとして 2013 年に宇宙工学国際コース(SEIC)を開始した。

九州工業大学 BIRDS プログラムは、以下の宇宙新興国が宇宙で重要な活動を始めることができるための方法として創設された。

参加国のための最初の衛星(場合によっては大学の最初の衛星)を設計、構築、試験、打ち上げ、運用することによって固有の宇宙プログラムを作成するための最初の段階を構築する。

ここで BIRDS プログラムの第一の目標が最初の衛星を開発することではないことを強調したい。究極の目標は各国で長期的かつ持続可能な宇宙計画を確立することである。国の最初の衛星の設計、開発、運用は究極の目標を達成するための 1 つのステップに過ぎない。

BIRDS プロジェクトは対応する参加国の数に柔軟に対応できる 2 年間の衛星開発プロジェクトである。表 2-1 はこれまで実施された運用プロジェクトとそれぞれの参加国(衛星のオーナー国)を示している。

表 2-1 これまでの BIRDS プロジェクトのリスト

プロジェクト	開始	参加国
BIRDS-1	2015 年秋	日本、ガーナ、モンゴル、ナイジェリア、バングラデシュ
BIRDS-2	2016 年秋	ブータン、マレーシア、フィリピン
BIRDS-3	2017 年秋	日本、スリランカ、ネパール
BIRDS-4	2018 年秋	日本、フィリピン、パラグアイ

BIRDS プロジェクトは国際協力を含む教育的なキャパシティビルディングプロジェクトである。1U キューブサットの開発作業を利用し宇宙工学を学ぶ選任大学院生として各国から2から3名の若手の技術者が九州工業大学に派遣されている。各世代の BIRDS プロジェクトはミッションの定義から運用まで2年間でそれぞれの衛星開発が終わるよう設計されている。2年以内に運用を行うことも衛星プロジェクト全体を2年間の修士課程に合わせるために重要である。この時間の制限を守るため3か月に1回衛星の打ち上げの機会がある国際宇宙ステーション (ISS) が衛星打ち上げのプラットフォームとして選択された。衛星の設計もまた簡素化されているため1年弱で引き渡すことができる。5つの衛星で構成されている第1世代の BIRDS-1 は ISS から日本時間 2017 年 6 月 7 日に放出された。3つの衛星で構成されている第2世代の BIRDS-2 は ISS から日本時間 2018 年 8 月 10 日に放出された。3つの衛星で構成されている第3世代の BIRDS-3 は ISS から日本時間 2019 年 6 月 17 日に放出された。2019 年 12 月時点で BIRDS-1 はすでに地球に落下している。BIRDS-2 と BIRDS-3 は BIRDS 地上局によっていまだ運用下にある。BIRDS-4 プロジェクトもまた 2018 年 10 月に開始された。図1は BIRDS-1 のフライトモデルとプロジェクトメンバーの写真である。図2は 2018 年 8 月 10 日に国際宇宙ステーションから BIRDS-2 が放出される瞬間を示している。図3は BIRDS-3 のフライトモデルを示している。



図1 BIRDS-1 のフライトモデルとプロジェクトメンバー

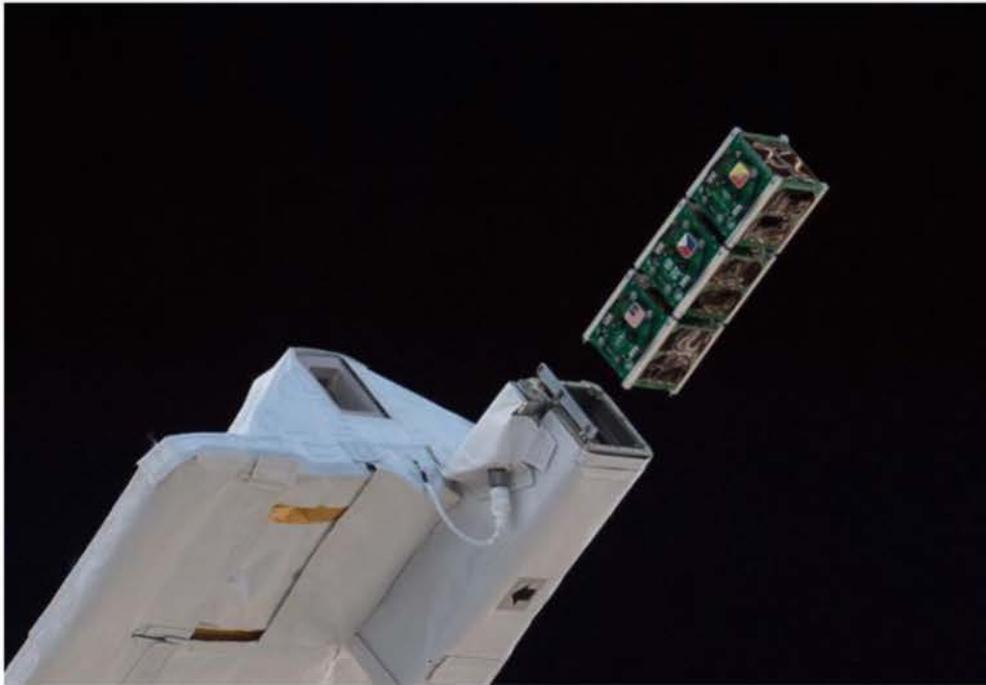


図2 2018年8月10日、BIRDS-2放出の瞬間、©JAXA



図3 BIRS-3 フライトモデル

参考文献

[2-1] Alex da Silva Curiel, Susan Jason, Kasia Wisniewska, Faisa Price, Guigleilmo Aglietti, Martin Sweeting, “Lessons Learned from Three Decades of Collaborative Space Mission Capacity Building Projects”, 68th IAC, IAC-17-B4.1.4, Adelaide, Australia, 25–29 September 2017.

3.キューブサットシステム

キューブサットシステム全体は図4に示すように3つの部分に分類できる。

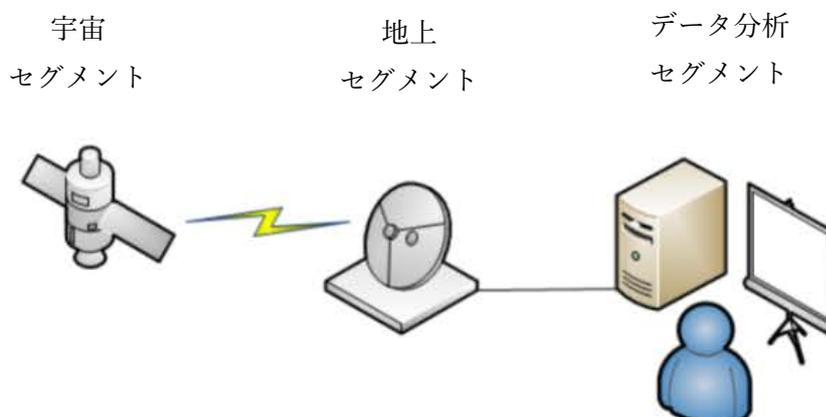


図4 キューブサットシステムの全体

a.宇宙セグメント

宇宙セグメントは軌道上のキューブサット自体のことである。これは1つまたは複数のキューブサット（コンステレーション）で形成されている。衛星設計(機械的、電氣的など)の要求はミッションの目的に適合する必要がある。バスとミッションペイロード間の明確なインターフェースは将来のプロジェクトで設計を再利用できるようにするために必要であり、衛星プロジェクト全体を通してシステムエンジニアリングの経験は必要不可欠である。

b.地上セグメント

地上セグメントはオペレーターが使用するキューブサットシステムの地上ベースのすべての要素で構成されている。通常、地上局は地上セグメントの主要な部分となる。地上局はアンテナ、通信機、追尾装置、地上局の機器を操作しデータを保存するためのコンピュータで構成されている。地上局はキューブサットにコマンドを送信し、衛星からのテレメトリ(ハウスキーピング)データとミッションデータを受信するために使用される。テレメトリデータは衛星の状態を監視し衛星運用の計画を作成するために使用される。地上セグメントにはさらに将来の分析のためミッションデータを分析する要素もある。

c.データ分析セグメント

データ分析セグメントは衛星ユーザーに対応している。このデータ分析セグメントはキューブサットからの搭載機器のデータを分析し、ミッションの結果を得るための収集段階である。

4. システムエンジニアリングとプロジェクトマネジメント

a. システムエンジニアリングの概要

システムエンジニアリングは宇宙プログラムとともに発展している。1つの良い例は人類を月に送り安全に地球に戻すことに成功したアポロ計画である。莫大な予算、多くの人員、複雑な設計、厳しい運用環境を含む前例のない計画を実現するためにシステムエンジニアリングの規範をうまく適用する必要があった。システムエンジニアリングは、メンテナンスのない運用が必要とされる過酷な宇宙環境で、複雑な宇宙システムが完璧に機能することを可能にする。NASA システムエンジニアリングハンドブックや INCOSE システムエンジニアリングハンドブックなど様々なハンドブックや教科書がある。システムエンジニアリングの一般的な事項についてはこれらの参考文献を参照してほしい。

衛星プロジェクトはシステムエンジニアリングやプロジェクトマネジメントを学ぶために理想的なプラットフォームである。衛星は非常に複雑である。したがって全体的な計画性のある観点、インターフェース管理、要求管理などがなければ決して完成することはない。衛星には機械、電気、材料、化学など多くの分野が含まれている。打ち上げの前に徹底的に検証する必要がある。1つのパーツに異常があるとシステム全体が故障する可能性がある。それゆえ故障モード分析は衛星が過酷な環境で動作することを保証するために非常に重要である。衛星プロジェクトには多くのメンバーが関与している。したがってワークブレイクダウンストラクチャー(Work Breakdown Structure, WBS)はプロジェクト管理に不可欠なツールである。リスクマネジメントもリスクが現実になる様々な可能性を考えると必要不可欠である。

b. ミッションの定義

衛星システムの開発の流れのなかでミッションの定義は最初の段階で実施される。プロジェクト全体の成功にとって非常に重要である。ミッションはシステムがステークホルダー(利害関係者)、顧客、ユーザーの要求を満たすことができるように定義する必要がある。たとえシステムが仕様通りに完全に構築されていても、その仕様書が使用者の要求を誤解して書かれていればそのシステムは使い物にならない。ミッションの定義を行う間はシステムにどのようにユーザーの要求を反映するかが重要である。BIRDS プロジェクトでは学生は最初の3か月間をこれに費やす。彼らは自国のステークホルダーと頻繁に話し合う必要がある。

c. 要求管理

ミッションが定義されるとシステム設計が始まる。システム設計は要求に基づいている。システム開発のすべてのタスクには理由、換言すれば要求がある。衛星プロジェクトはしばしば互いに離れた場所によって行われることがあるので、文章化された要求がコミュニケーションの唯一の根拠になることがよくある。要求が誤解されている場合、シス

テム、サブシステム、コンポーネント、パーツは上位の目的を満足させる方法としての目的を果たすことができない。それぞれの BIRDS プロジェクトでは学生は要求分配表 (Requirement Allocation Sheet, RAS)を作成する。RAS ではユーザー(ステークホルダー)の要求、システム要求、サブシステム要求はすべて Excel シートに記載される。各サブシステム要求について設計要求と検証要求が要求を検討する方法とともに書かれている。RAS は衛星プロジェクトの聖書として機能する。衛星設計に変更があった場合 RAS を修正し、最新の状態に保つ必要がある。よってそれを適切に管理することによりメンバーが要求変更による影響を理解するのに役立つ。

d.作業分担

衛星開発はチームワークが必要であり教育としてのキューブサットはそれを学ぶための素晴らしい方法である。BIRDS プログラムでは日本人と外国人の学生が混ざってプロジェクトを行っている。彼らは相互に助け合う。WBS はハードウェアやソフトウェアの開発だけでなくシステムのライフサイクルに必要なすべての作業を記載する。周波数ライセンスの要請などプロジェクト管理に関連するタスクを含める必要がある。記載されている各タスクはチームメンバーの 1 人に割り当てられる。WBS によってプロジェクト全般のスケジュールを作成できる。

e.リスク管理

衛星プロジェクトはリスクに満ちている。従来の衛星プロジェクトではそれぞれのリスクが慎重に評価され、リスクイベントの発生確率の低減やリスクイベントが実際に起きた際の影響の低減に最大の労力が費やされている。キューブサットプロジェクトではリスクは大抵プロジェクトチームのメンバーの経験に基づいて評価される。すべてのリスクに取り組む時間がないのである。それゆえ各リスクの重大性(リスクの発生確率と発生した際の影響の深刻さをかけあわせたもの)に基づいて優先順位をつける必要がある。リスク管理の考え方は安全管理に似ている。

f.故障モード影響解析と故障の木解析

故障モード影響の解析(Fault Mode Effect Analysis, FMEA)は特定のコンポーネントの故障または誤作動が全体のミッション機能に及ぼす影響を分析する。これはボトムアッププロセスである。故障の木解析 (Fault Tree Analysis, FTA)はミッション機能に影響を与える出来事の原因を分析する。この分析は”and/or”論理に基づいている。FTA はまた運用の間も非常に重要である。衛星は人間が近づいて観察することができない場所にあるので FTA を通して運用中に発生した異常の原因を特定する必要がある。

g. 検証と確認

システム開発は要求に基づいている。開発の各段階でシステムが要求を満たしているかどうか検証する必要がある。検証はシステムが正常に構築されているかどうか確認することである。検証は要求ごとに行われる。検証方法には試験、分析、デモンストレーション、検査などが含まれる。確認とは適切なシステムが構築されているかどうかをユーザが確かめることである。結局のところ衛星を使うのはユーザーであり、ユーザーが衛星が要求を満たしているかどうかを評価する。そのために、ミッション定義の段階が非常に重要である。なぜなら各ユーザーの要求をシステムまたはサブシステムの要求に変換するためである。

5.宇宙セグメント

この章では、BIRDS バスを例としてキューブサットの設計について説明する。BIRDS バスの設計は、教育を目的としたキューブサット開発プロジェクトのための電気系標準バスの1つである。そこでは、主に電力システム (EPS) およびデータ処理システム(C&DH)が標準バスの要求を満たすように設計されている。通信システムと外部インターフェースも標準バスに対して設計される。EPS 設計は、さまざまな打ち上げサービスの安全要求に対応できるようにする必要がある。データ処理システムは、迅速なトレーニングで学習できるように設計されている。そのサブシステムごとに専用のマイクロコントローラーを使用する。マイクロコントローラーは、シンプルなシリアルインターフェースと共有フラッシュメモリが組み合わされている。BIRDS バスは2枚のプリント回路基板 (PCB)、フロントアクセスボード (FAB) とオンボードコンピューターボード (OBC) で構成されている。FAB はEPS と外部インターフェースを処理する。OBC には、データ処理と配電の機能がある。通信システムはUHF トランシーバーとは異なるボードを使用し、展開可能なダイポールアンテナが外部パネルに取り付けられている。

まず、電氣的仕様について説明し、次に機械的仕様について説明する。

a.電氣的仕様

電力システム

キューブサットのような超小型衛星の打ち上げにおいて、重要な安全要求の1つは、コールドローンチを保証する3つのインヒビットである。キューブサットは、軌道上に放出されるまで電気負荷に電力が供給されていないことが必要である。コールドローンチは、3つ以上のスイッチによって保証される必要がある。キューブサットが3つのインヒビットを満たすと、2つのスイッチが故障しても、衛星には太陽電池やバッテリーからの電力が供給されない。

もう1つの重要な安全要求は、バッテリーの故障防止である。過充電などの偶発的なバッテリーの故障は、人員の死亡またはロケットの破壊につながる可能性のある重大な問題と見なされる。したがって、これは2故障許容、つまり3つのインヒビットによって防止する必要がある。

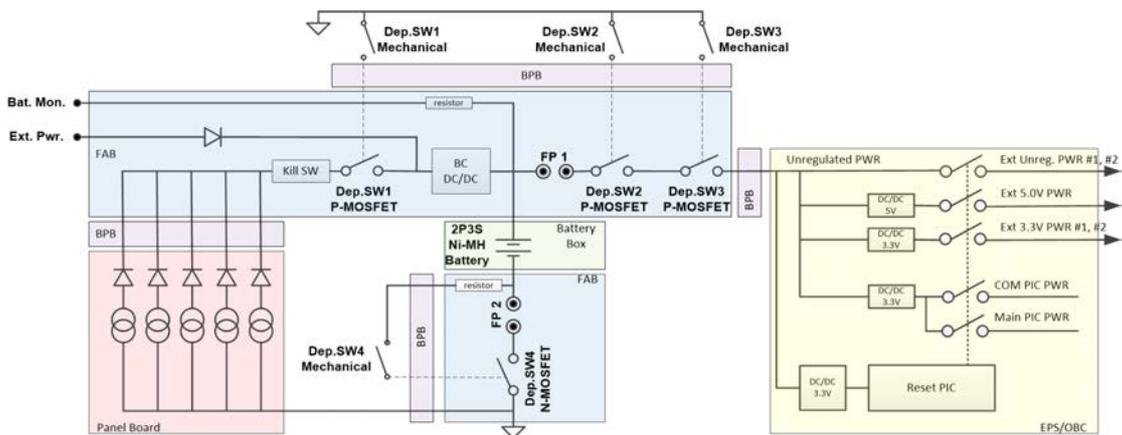


図 5 BIRDS バスにおける EPS の概略図

図 5 は、BIRDS バスの EPS の概略図を示している。3つのインヒビットによるコールドローンチ要求を満たすために、SW1、SW2、SW3、およびSW4の4つのディプロイメントスイッチ(展開スイッチ)がある。SW1のディプロイメントスイッチは、太陽電池とバッテリーの間にあり、太陽電池から衛星の他の電気システムへの電力を遮断する。冗長系の設計として、SW2とSW3がバッテリーと電気負荷の間にあり、衛星の電気負荷への電力を遮断する。バッテリーは、衛星で最も高密度なエネルギー源であり、通常、安全性の検討にとって最も重要なアイテムである。SW4はバッテリーと衛星のグラウンド間にある。放出されるまで、電力が遮断された状態にする。これらの電源スイッチは、専用のディプロイメントスイッチを介して1つずつ制御できる。または、複数のスイッチを1つのディプロイメントスイッチで柔軟に制御できる。スイッチの数はBIRDS-2の設計から増加している。ただし、追加のスイッチにより、この設計を変更することなく、従来のロケット打ち上げサービスなどとまったく異なる打ち上げサービスにも使用できる。

フライトピンFP1およびFP2は、外部からEPSを機械的に制御する。フライトピンが挿入されている場合、電力線は機械的に切断され、地上試験と衛星輸送時の安全を確保する。BIRDSバスは、フライトピンを外部電源機能およびディプロイメントスイッチから完全に分離する。外部電源は、保護ダイオード付きのバッテリー充電レギュレーター(BCR)に直接接続され、衛星が地上試験またはバッテリー充電を必要とするときに接続される。安全要求は打ち上げサービスごとに異なるため、3つのインヒビットは必ずしも必要ではない。多くの打ち上げサービスでは、安全要求に従ってSW3またはSW4は不要である。SW3、SW4が不要な場合は、ジャンプスイッチJP3、JP4を接続し、SW3、SW4を無効にして確実に接続する。

表 1 コールドローンチにおけるスリーインヒビット条件

放出要求	インヒビット	インヒビット条件のスイッチ
	搭載する太陽電池	SW1 – SW2 – SW3

従来のロケット
サービス

搭載するバッテリー SW2 – SW3 – SW4

バッテリーは高エネルギー密度のデバイスであるため、取り扱いには注意が必要である。バッテリー保護のために、過充電、過放電、および外部短絡に対する3つの保護メカニズムが BIRDS バスに実装されている。コールドローンチにおける条件を満たすスイッチを保護システムに使用して、バッテリーを他のシステム、つまり電源と電気負荷から分離することができる。BIRDS バスでは、放出の瞬間までスイッチ SW1 と SW4 が太陽電池からバッテリーを切断する。また、BCR には、太陽電池とバッテリー間の過充電に対するバッテリー保護機能がある。SW2、SW3、および SW4 は、バッテリーを電氣的負荷から切り離し、過放電に対する保護システムのように機能する。SW4 には、バッテリーを外部短絡から保護する別の機能がある。通常、バッテリーには十分な絶縁層があり、BIRDS バスにはバッテリーの周囲に2層の絶縁層がある。事故によってその二重絶縁層が破壊された場合でも、SW4 はバッテリーを隔離し、3番目の保護装置として外部短絡から安全に保つ。

表2 バッテリーにける3つのインヒビット

保護アイテム	保護スイッチ
過充電	SW1 – BCR – SW4
過放電	SW2 – SW3 – SW4
外部短絡	二重絶縁 – SW4

BIRDS バスは、BCR としてリニアテクノロジー社の LTC3119 を使用している。この選択には多くの理由があるが、主な理由は、太陽電池の最大電力点制御をサポートすることである。LTC3119 には最大電力点制御の入力ピンがあり、BCR 入力電圧は最大電力点制御のピンと同じ値を維持する。この制御により、電氣的負荷条件が変化しても、太陽電池から最大電力を利用できる。以前の EPS は3つの BCR を使用し、各レギュレーターの後追加のブロッキングダイオードが必要であった。BCR には内部にブロッキング機能が含まれているため、BIRDS バスの設計を変更し BCR を1つだけ使用することで、ブロッキングダイオードを排除し、エネルギー損失を減らした。

衛星の運用が終了すると、衛星にはすべてのエネルギー源を空にするパッシベーション機能が必要である。BIRDS バスには、キルスイッチユニットがある。このキルスイッチユニットは、軌道上で運用を継続する理由がない際に、パッシベーションを行う。キルスイッチは、MOSFET スイッチ、ラッチリレー、およびラッチリレードライバの組み合わせである。スイッチが ON になると、太陽電池と衛星間の接続が完全に切断され、バッテリーが空になり、衛星がシャットダウンする。このスイッチの起動は非常に危険であるため、BIRDS

バスには、冗長性を形成するためのキルスイッチユニットとして 2 つのキルスイッチが並列にある。各キルスイッチは、2 つの異なるマイクロコントローラーによって個別に制御され、誤って両方のキルスイッチが同時に ON になったり、マイクロコントローラーの障害が発生したりしないようにしている。

この EPS は、最大 3U キューブサットをサポートするように設計されている。実際、キューブサットの発電量は、軌道条件、太陽電池の性能、姿勢制御能力など、多くの要因に依存する。BIRDS は AZURSPACE の 3G30A 太陽電池を使用している。最大電力点の理想の場合、1 つの太陽電池が 1.2 [W] を発電し、3U キューブサットは、展開可能なパネルシステムがある場合、3 つの表面に最大 18 の太陽電池を接続できる。非常に大まかな仮定の上で、最大発電量は 21.6 [W] 未満と見積もることができる。LTC3119 BCR は 18 [V] の最大入力電圧と 5 [A] の最大電流容量を供給する。PCB およびその他のデバイスの各電源ラインの電流容量も、2 [A] の連続電流に耐えるように設計されている。BCR の最大電圧と PCB の連続電流容量を考慮すると、BIRDS バスは最大 36 [W] をサポートできる。これは 3U CubeSat の最大電力も大きい。

ミッションシステムの電気負荷に関して、ノミナルのバッテリー電圧 3.8[V] と最大の連続電流 2[A] を考えると、一つのミッションシステムは最大 7.6[W] の電力を使用可能である。

コマンドおよびデータ処理システム

BIRDS バスは、3 つの主要なサブシステム、EPS サブシステム、通信サブシステム、およびコマンド・データ処理サブシステムのそれぞれに 3 つの専用マイクロコントローラー (RESET PIC、COM PIC、MAIN PIC) を使用する。1 つの追加のマイクロコントローラー (FAB PIC) は、監視デバイスとして電力情報を収集する。BIRDS 衛星が実用的なミッションのキューブサットである場合、これだけ多くのマイクロコントローラーを使用する必要はない。多くのマイクロコントローラーが何らかの処理能力と相互通信を使用して協調作業を処理する必要があるため、多くのマイクロコントローラーが連携して動作する必要がある場合、オーバーヘッドから電力リソースの損失は避けられない。ただし、BIRDS バスの各サブシステムは、プロジェクトメンバーが実践的トレーニングを行い、簡単に開発できるように、専用のマイクロコントローラーを備えたシンプルなものである必要がある。1 つまたは 2 つのマイクロコントローラーがすべてのバスシステムの作業を行う場合、初心者には複雑すぎる可能性があり、チームメンバー間で作業を共有することは困難である。ただし、複数のマイクロコントローラーが単一のサブシステムの作業を共有する場合、システムは不必要に複雑になる。サブシステムごとに 1 つの専用マイクロコントローラーは、その単純さから、若手のエンジニアのトレーニングに適している。

BIRDS バスは、様々な理由からシンプルな 8 ビットマイクロコントローラーファミリーを使用している。BIRDS プロジェクトは教育プロジェクトであるため、高性能マイクロコントローラーよりもシンプルで使いやすいマイクロコントローラーの方が優れている。

BIRDS バスのマイクロコントローラーの性能は、他のキューブサットプロジェクトで使用されているマイクロコントローラー、特により実用的なミッションを持つマイクロコントローラーに比べて劣る場合がある。ただし、これらの単純なマイクロコントローラーは、シンプルな役割を持ち、姿勢制御を行わない教育プロジェクトには十分である。姿勢制御やその他のオンボード処理などのデータ処理における性能を改善する必要がある場合は、より強力なマイクロコントローラーまたはFPGAを備えた追加のPCBを接続することができる。

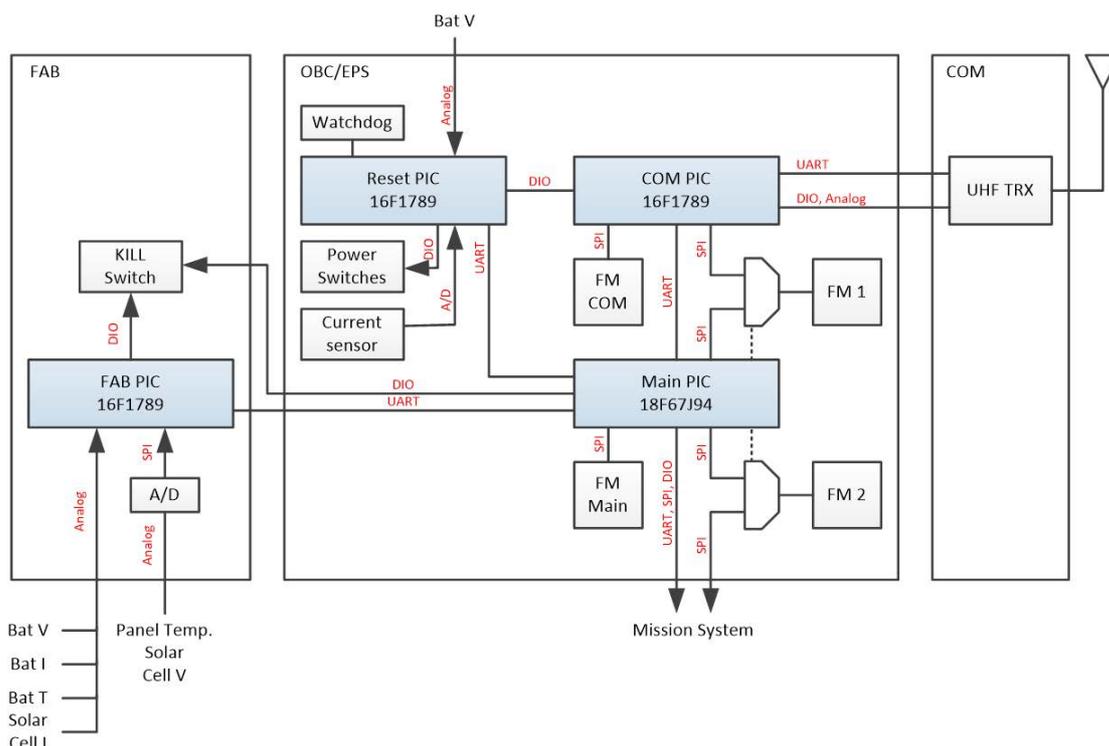


図 6 BIRDS バス データ処理システムの概略図

図 6 に、データ処理システムの概略図を示す。マイクロコントローラーで簡単にトレーニングできるように、BIRDS バスは 1 種類のマイクロコントローラーのみを使用する。PIC マイクロコントローラーシリーズは、多くのキューブサットプロジェクトで使用された実績から選択された。たとえば、シンプルな 8 ビット PIC16F1787 マイクロコントローラーは、以前、九工大で開発された衛星に使用されており、問題なく動作した。PIC16F1787 のメモリサイズの制限により、同じ PIC ファミリーシリーズの 28 [kbytes] プログラミングメモリを備えた PIC16F1789 が BIRDS バスに選択されている。すべてのサブシステムで同じ PIC16F1789 マイクロコントローラーを使用することを推奨する。ただし MAIN PIC はすべての衛星データを処理するため、他のマイクロコントローラーに比べて高速で十分な計算能力が必要である。バスシステムとミッションシステムの間データ伝送のボトルネックが存在する可能性があり、将来のプロジェクトでさまざまなミッションシステムデータを

処理するための適切なプログラミングメモリが必要である。そのため、MAIN PIC には、より強力な PIC マイクロコントローラー PIC18F67J94 が使用されている。128 [kBytes] の十分なプログラミングメモリがあり、ミッションシステムの要求に従ってプログラムを簡単に変更できる。また、データ処理用に最大 64 [MHz] のクロック速度をサポートする。MAIN PIC には、ミッションシステムとの 10 ピンのデジタルインターフェースがある。これらのデジタルインターフェースピンは、シリアルインターフェースに設定できる。たとえば、最大 5 チャンネルの UART インターフェースを利用できる。

データ処理システムのデータストレージには、不揮発性メモリが必要である。BIRDS バスには 4 つの不揮発性メモリがある。それらの 2 つは MAIN PIC と COM PIC の専用保存メモリであり、他の 2 つはマルチプレクサとの共有メモリである。共有メモリの 1 つは MAIN PIC と COM PIC の間であり、もう 1 つは MAIN PIC とミッションシステムの間である。各共有メモリのマルチプレクサは、MAIN PIC によって制御される。BIRDS バスは、マイクロコントローラー間の通常のインターフェースにシンプルな UART シリアルインターフェースを使用する。使い方は簡単であるが、速度は 115200bps に制限されている。共有メモリは、シリアルインターフェースの速度が不十分な場合に大量のデータ転送を行うことを可能にする。BIRDS バスは、不揮発性メモリとして 1 種類のフラッシュメモリのみを使用する。これは、1 [Gbit] 容量の SPI インターフェース NOR タイプフラッシュメモリである。キューブサットが通常のミッションの目的を持っている場合は、これで十分である。使用されるフラッシュメモリは 1 種類のみであるため、メモリ処理用の共通ライブラリコードをコーディング作業に使用できる。不揮発性メモリだけでなく、シリアルインターフェースにも、BIRDS バスは 2 つの一般的なシリアルインターフェースプロトコルのみを使用する。組み込みシステムには多くの種類のシリアルインターフェースがあるが、BIRDS バスには UART および SPI シリアルインターフェースのみが使用されている。

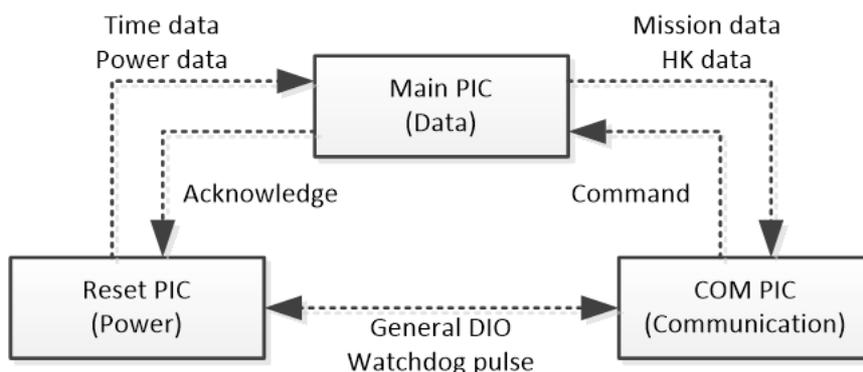


図 7 データ処理システムにおけるシンプルなリングネットワーク

BIRDS バスはデータ処理用の一種の分散システムであるため、3 つの主要なマイクロコントローラー間に明確に定義されたインターフェースが必要である。図 7 に示すように、こ

これらの3つのマイクロコントローラーは、プライマリインターフェース用の UART によって相互に接続され、非常に単純な擬似的リングネットワークを構築する。通常のメッセージは、この単純なリングネットワーク内のマイクロコントローラー間で送信される。RESET PIC は、キューブサットシステム全体の電源を制御する。他のマイクロコントローラーが、RESET PIC からの通常のメッセージへの確認応答を送信できない場合、RESET PIC はマイクロコントローラーの電源をリセットして、強制的に電源をリセットできる。これらの電源制御は非常に信頼性が高く、RESET PIC はトラブルを最小限に抑えるために非常にシンプルで明確なプログラミングコードを備えている。RESET PIC では、衛星時刻データも記録する。ただし、衛星に搭載される電子部品は、どのようなものであれシングルイベントにより軌道上で故障する可能性がある。RESET PIC も例外ではない。RESET PIC が故障した場合に備えて、外部監視のウォッチドッグ IC が RESET PIC に接続され、RESET PIC に故障が起きた時にリセットをかける。

3つの主要なマイクロコントローラーは、結合されたデータ処理システムとして機能する必要があり、多くの場合、時間同期が必要である。各マイクロコントローラーには、専用の発振器を備えた独自のプライマリクロックソースがある。ただし、OBC 内の1つの 32.768-[kHz]発振器は、3つすべてのマイクロコントローラーの共通クロックソースとして使用される。共通のクロックソースは、各マイクロコントローラーのセカンダリクロックソースになり、3つのマイクロコントローラー間で同時にタイマー割り込みを作成する。この同時タイマー割り込みは、データ処理動作のタイミングを同期させるだけであり、この共通のクロックソースにより、衛星時間の管理がはるかに容易になる。この同期データ処理は、UART リングネットワークの通常のメッセージング作業に特に役立つ。

BIRDS バスでは、COM PIC のみが地上局との通信における処理を行う。UART リングネットワークまたは共有フラッシュメモリを介して MAIN PIC とデータの通信を行う。UART インターフェースは少量のデータには十分である。ただし、画像データなどの大容量のデータを送りたい場合は、効率を上げるために共有フラッシュメモリを使用する必要がある。通常、2種類のデータが MAIN PIC から COM PIC に転送される。1つはハウスキーピングデータ(衛星の状態に関する基本情報)、もう1つはミッションシステムからのミッションデータである。データは UHF 通信機によって地上局に送信される。

COM PIC は地上局からコマンドを受け取り、その後の処理のためにほとんどのコマンドを MAIN PIC に送信する。また、COM PIC には、データを保存するための独自のフラッシュメモリがある。データをダウンロードする簡単なコマンドは MAIN PIC で処理する必要がないため、COM PIC で直接処理して迅速に動作することができる。

MAIN PIC はすべての衛星データを処理する。FAB PIC および RESET PIC から電源システム情報を収集する。また、MAIN PIC は、バスシステムとミッションシステム間のデータブリッジである。ミッションシステムからのすべてのデータは、UART、SPI、または共有フラッシュメモリのシリアルインターフェースを通じて最初に MAIN PIC に送られる。前述

のように、地上局からのコマンドのほとんどは MAIN PIC でも処理され、MAIN PIC も1つのキルスイッチを制御する（リスクを最小限に抑えるために別のキルスイッチは FAB PIC が個別に制御する）。

通信システム

BIRDS バス通信システム (COM) は、標準バス用に新しく開発されたものではない。その仕様は、主に前世代の遺産である BIRDS-1 および BIRDS-2 から選択されている。BIRDS バスは、アップリンクとダウンリンクの両方向にアマチュア無線帯域の UHF 周波数を使用する。1つの通信機が半二重モードで通信を処理し、変調にはガウス最小偏移変調 (GMSK) が使用される。BIRDS の通信システムは教育ミッションをサポートするため、衛星と地上局の間に高速通信を行う必要はない。実際、通信速度が比較的遅い場合は、ビットあたりのエネルギーが高いため、通信リンクの安定性に利点がある。通信のボーレートは両方向ともわずか 4800 [bps] で、データ形式は AX.25 プロトコルに基づいている。図 8 に示すように、シンプルなダイポールアンテナが外面パネルに取り付けられている。1U キューブサットは小さいため、UHF 周波数用のダイポールアンテナとして固体アンテナを構造に取り付けることができない。BIRDS バスは、ヒートカッター付きの展開可能なアンテナを使用する。アンテナは、超高分子量ポリエチレンのひもによってパネルの表面に巻かれた状態で、衛星が軌道上に放出された後、熱線がヒモを切断し、展開する。

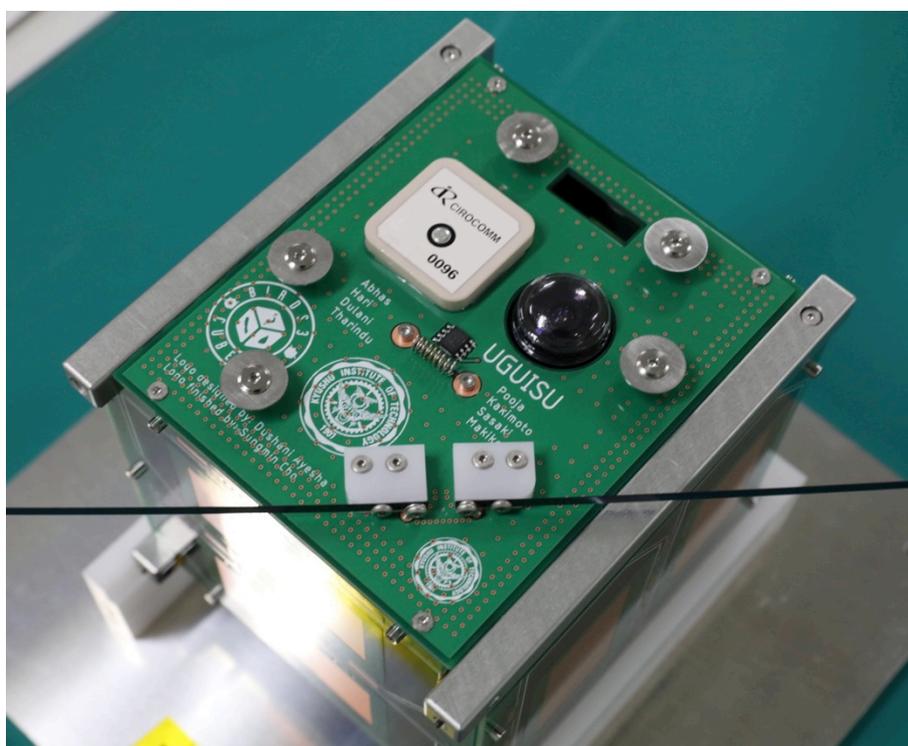


図 8 BIRDS-3 外面パネルとダイポールアンテナ

これらの通信仕様は、特殊な機器なしで地上局を簡単に構築できるように決定されている。BIRDS プロジェクトのメンバーは、衛星運用のためにそれぞれの国に独自の地上局を建設する必要がある。UHF 周波数、GMSK 変調、および標準の AX.25 プロトコルは、アマチュア無線データ通信の非常に一般的な仕様であり、多くの通信機がすでに市場に出回っている。

BIRDS-3 プロジェクトにおける BIRDS バス、FAB および OBC

FAB は標準バス EPS の本体である。BIRDS-3 衛星では、5 つの外部パネルの太陽電池から生成された電力を収集し、ディプロイメントスイッチ、フライトピン、および BCR を使用して電力を制御する。SW1 と SW4 の 2 つのスイッチは、1 つの展開スイッチによって制御され、SW2 は別の展開スイッチによって制御される。図 9 に示すように、2 つのフライトピン FP1 と FP2 も 3 つのインヒビットで使用される。ただし、BIRDS-3 の場合、フライトピンは限定的な安全スイッチとしての保護機能を実行する。従来のロケット打ち上げサービスに比べて非常に短い時間で制御された状態であったとしても、ISS での展開前に 2 つのフライトピンが引き抜かれた後、1 つのスイッチ SW2 のみがバッテリーと電気負荷の間に配置されている。このため、JAXA は FP1 と FP2 を、BIRDS-3 の場合の 1 つの抑制と見なしている。この問題をサポートするために、電源システムに SW4 が追加された。SW3 は、JP3 のジャンパーピンを接続する必要がないため、無効化されている。

BIRDS-3 は、図 10 に示す小さな検出スイッチを展開スイッチとして使用し、MOSFET スイッチ SW1、SW2、および SW4 の制御信号を提供する。BIRDS-3 キューブサットレールの先端に 2 つの検出スイッチが挿入されている。BIRDS-3 がポッド内にある場合、検出スイッチが押され、SW1、SW2、および SW4 がオープン状態になる。BIRDS-3 が POD から展開されると、検出スイッチが解放され、スイッチが閉じる。

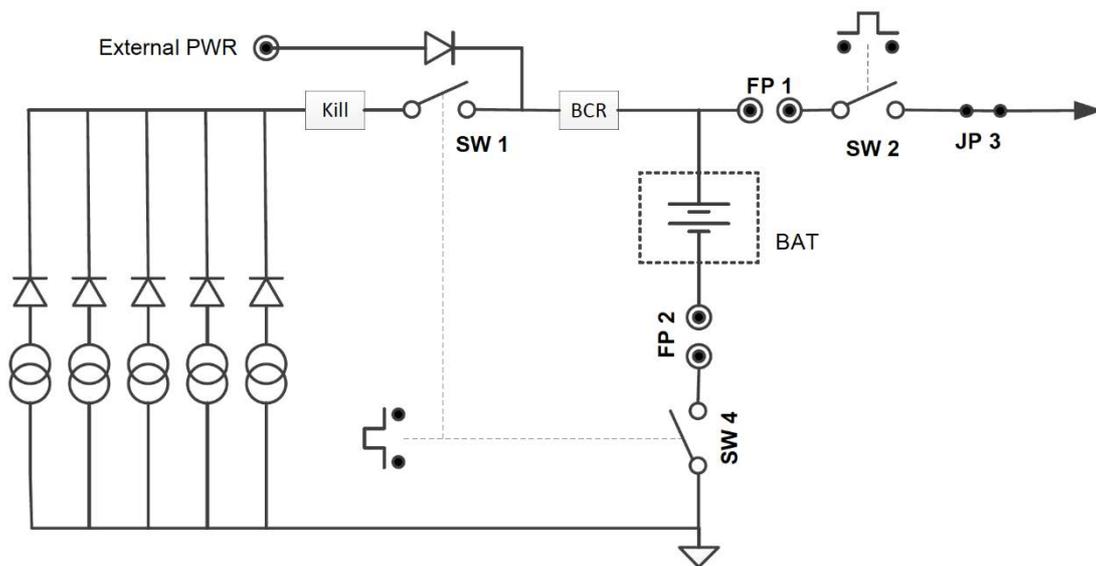


図 9 BIRDS-3 EPS 概略図



図 10 ディプロイメントスイッチ(左)©C&K;レール上のディプロイメントスイッチ(右)

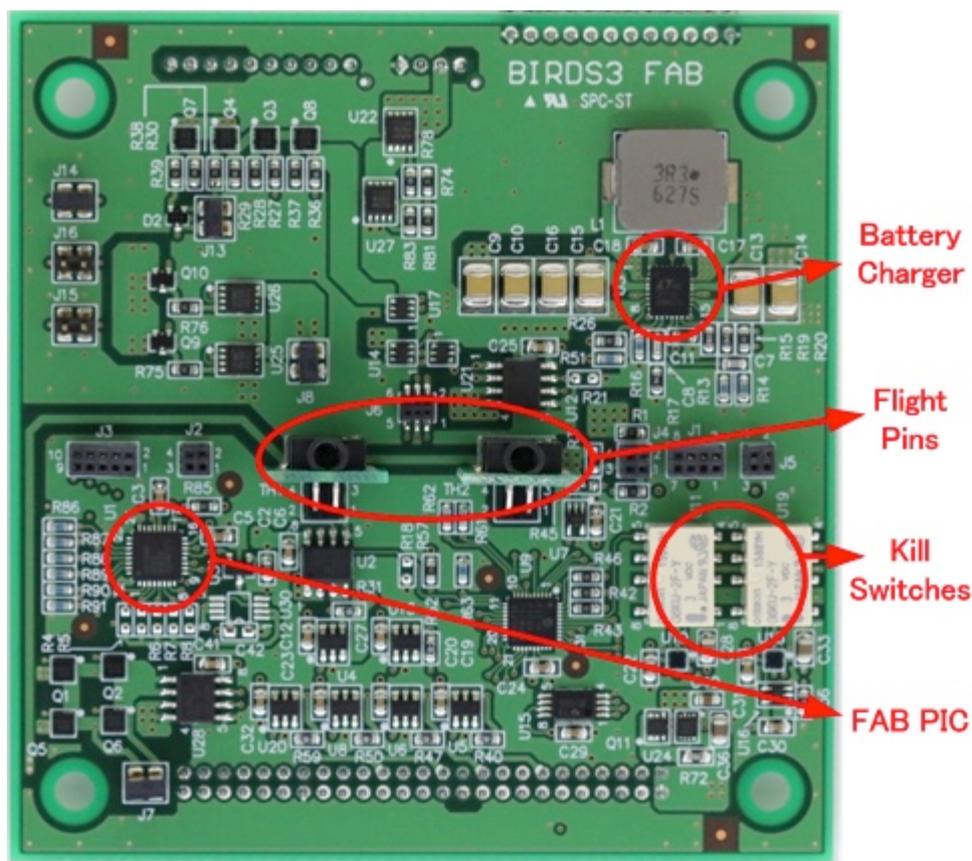


図 11 BIRDS-3 FAB

図 11 は、BIRDS-3 FAB を示している。2つの取り外し前のフライトピンは、ボードの中央にある。これは、2つの接点が1[A]の定格電流容量を持つジャックスイッチであり、BIRDS バスの EPS に対して2[A]の定格電流を並列接続でサポートする。2つのキルスイッチはボードの右下にあり、バッテリーチャージャーも右側に表示されている。FAB PIC は図の左下にあり、外部パネルボードの温度を含む太陽電池からの電圧と電流をモニタする。バッテリーの状態は、電圧、電流、および温度についてもモニタされる。BIRDS バスは、LTC3119 昇降圧 DC / DC コンバーターをバッテリー充電に使用する。2[V]~18[V]の入力電圧を採用でき、直列接続で2~6個の太陽電池をサポートするのに十分である。出力電力の範囲は0.8[V]~18[V]で、最大電流は5[A]である。プリントされた FAB 回路基板は、最大連続電流2[A]をサポートするように設計されている。

3つの主要なマイクロコントローラーはすべて、データストレージフラッシュメモリを備えたOBCボード上にある。各マイクロコントローラーは異なるサブシステム専用で、UART シリアルインターフェースに接続され、BIRDS バス設計に従ってリングネットワークを構築する。COM PIC は、通信サブシステムを担当するマイクロコントローラーである。RESET PIC は、電力サブシステムを担当する。MAIN PIC は、コマンドおよびデータ処理サブシステムを担当する。図 12 は、非常にシンプルなレイアウトの OBC ボードを示して

いる。OBC ボードの PIC マイクロコントローラー (図 13) は、複数の機能を備えたワンチップマイクロコントローラーである。OBC ボードには、アナログ/デジタルコンバーター、シリアルインターフェースコントローラーなどの追加のデバイスはない。

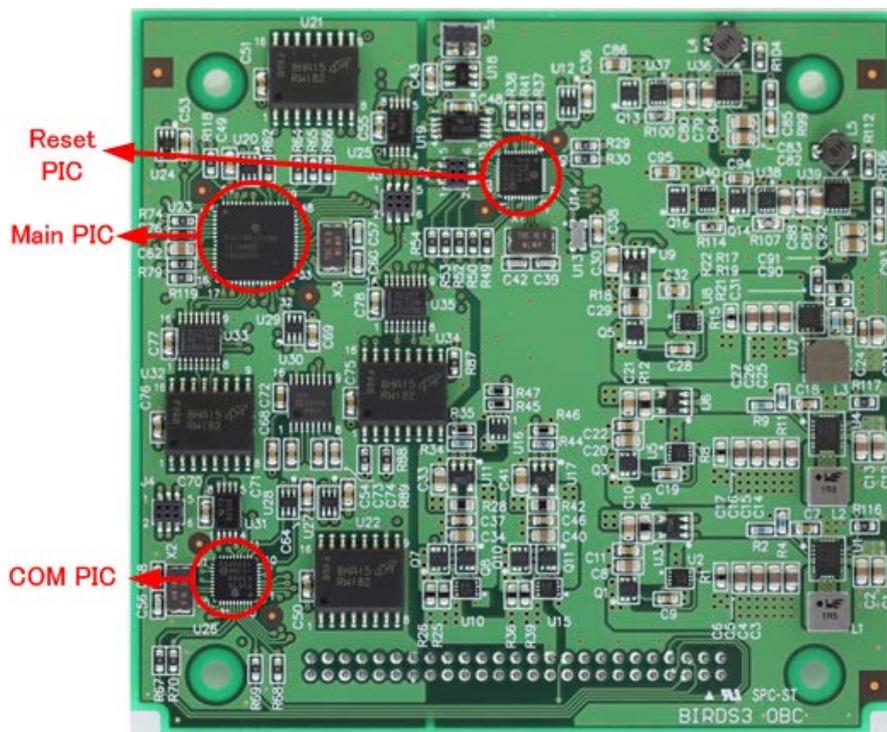


図 12 BIRDS-3 OBC 基板

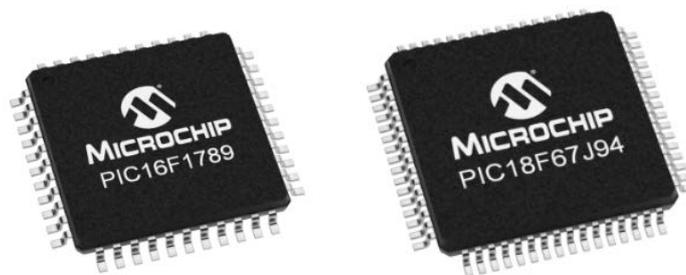


図 13 BIRDS バスにおける PIC マイクロコントローラー, ©Microchip

OBC ボードには、配電機能も搭載されている。図 14 は、BIRDS バス配電のブロック図を示す。多くの電源スイッチは RESET PIC によって制御され、電力を分配する。各電源は電流センサーで監視され、過電流保護回路も備えられている。RESET PIC は、他の 2 つのマイクロコントローラー (COM PIC と MAIN PIC) の電力を制御し、これら 2 つのマイクロコントローラーのウォッチドッグのように機能する。BIRDS バスには、ミッションシステムへの電力供給のための 5 つの電力線がある。そのうちの 2 つは、バッテリーに直接繋

がった未調整 (Unregulated) 電力である。2本の電源ラインを備えた 3.3- [V]電源と、1本のラインを備えた 5- [V]電源もある。BIRDS-3 の場合、COM およびアンテナ展開システムに2つの未調整の電力線が使用され、FAB PIC およびミッションシステムに2つの 3.3 [V]電力線が使用される。BIRDS-3 で 5 [V]電源を使用するデバイスはない。ミッションシステムの数がこれらの電力線よりも多い場合、ミッションシステムに電力をより適切に分配するために、ミッションボードに追加の電源スイッチを取り付ける必要がある。このような追加のスイッチは通常、MAIN PIC によって制御される。

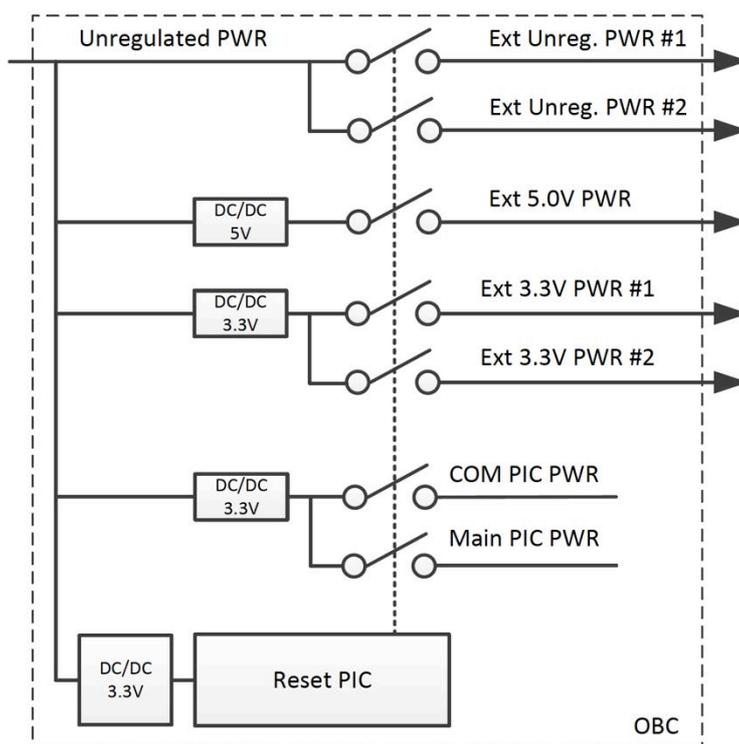


図 14 OBC 基板の配電図

底面基板

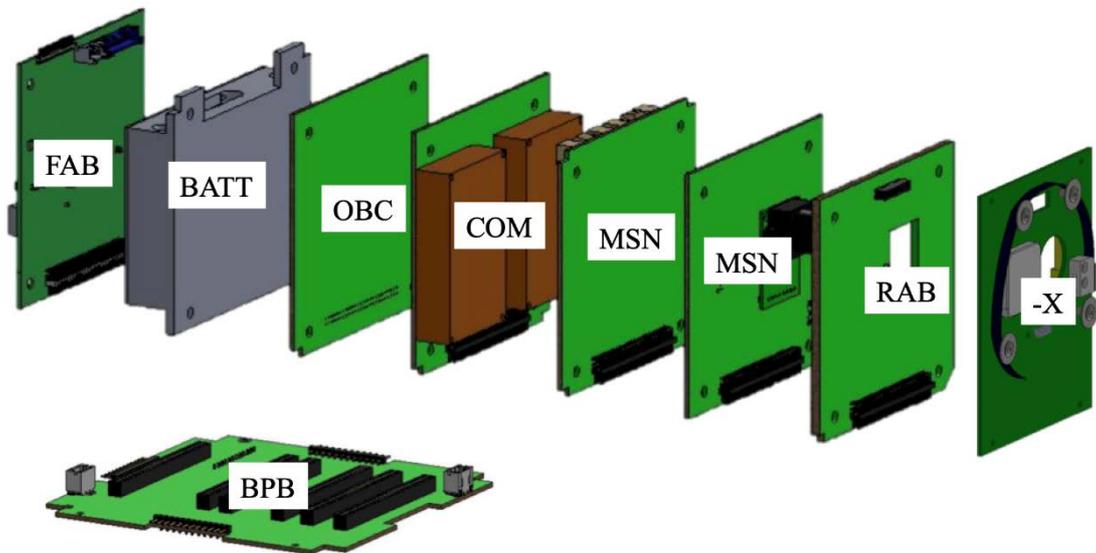


図 15 BIRDS キューブサットの内部構造

図 15 は、1 つの Back Plane Board (BPB)、7 つの内部ボード、1 つのバッテリーボックス、および 1 つの外部-X パネルを備えた BIRDS キューブサットの内部ビューを示している。すべての内部ボードは、50 ピンコネクタを使用して BPB 経由で接続され、ハーネスの使用を最小限に抑える。多くのキューブサットは、組立作業の複雑さと故障のリスクが増加するハーネスの使用を最小限に抑えるように設計されている。BPB システムはそのような設計の 1 つである。九州工業大学は BIRDS-1 から BPB スタイルを使用している。BIRDS バスも BPB システムを使用して、各ボードを接続する。ハーネスレス設計だけでなく、標準設計にも多くの利点がある。BIRDS バス BPB は、図 16 に示すように、50 ピンコネクタを使用する。これには、電力線、バスシステムデータ線、およびミッションシステムの固定ピン割り当てがある。新しいプロジェクト用にボードが開発された場合、固定ピンの割り当てに従うと、以前のプロジェクトの他のボードで問題なく使用できる。ピン割り当てが固定されているので、バスシステムにはほとんど問題がない。ただし、ミッションペイロードの場合、固定ピンの割り当てによって設計の柔軟性が制限されることがある。柔軟性を保証するための 1 つのアイデアとして、ソフトウェア的に配線のルーティングを設定する方法がある。1 つの例は、プログラマブルロジックデバイス (CPLD) などのデバイスを使用することである。 [2]。

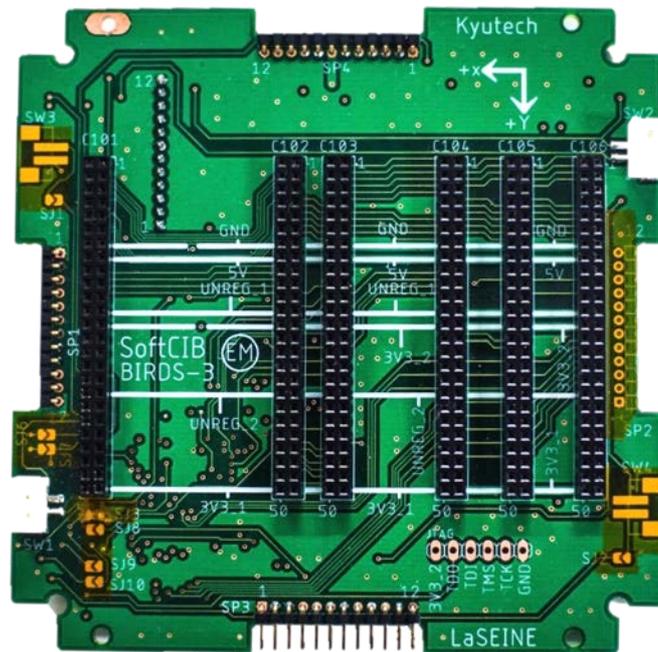


図 16 BPB の正面図

b. 機械的仕様

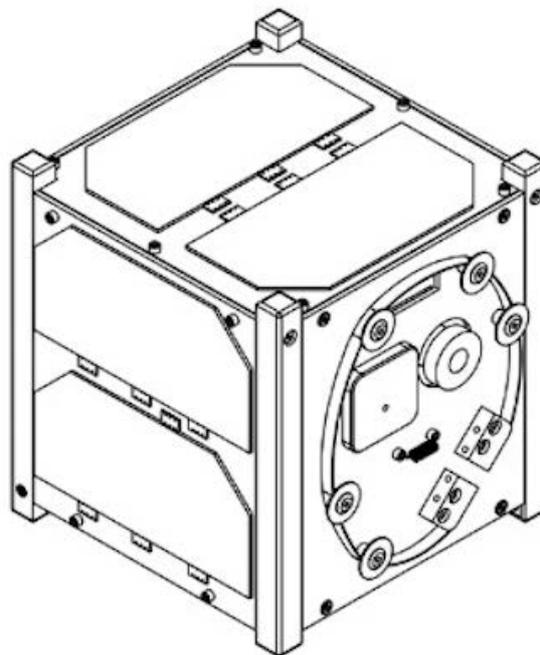


図 17 BIRDS-3 の外観図

図 17 に例として BIRDS-3 の外観図を示す。BIRDS-3 は 1U キューブサットで、+ X 外面パネルに通信アンテナがある。衛星の外部サイズは、次の図に示すキューブサット規格の

100 [mm] x 100 [mm] x 113.5 [mm]に従う必要がある。

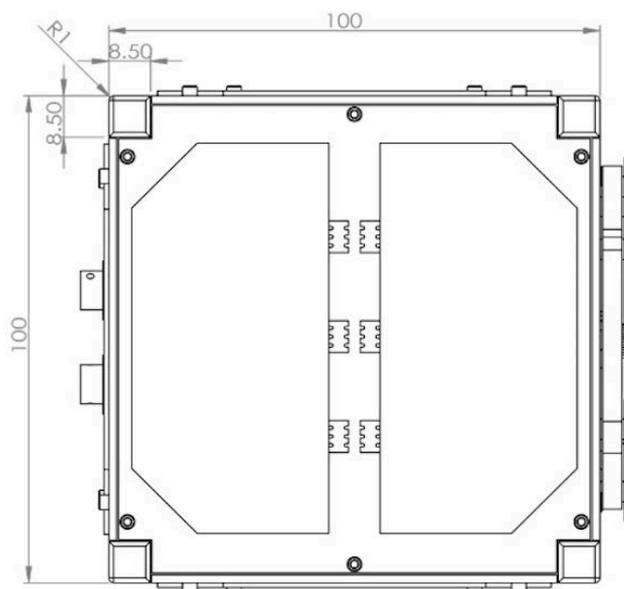


図 18 Z 軸から見た BIRDS-3 の外観図

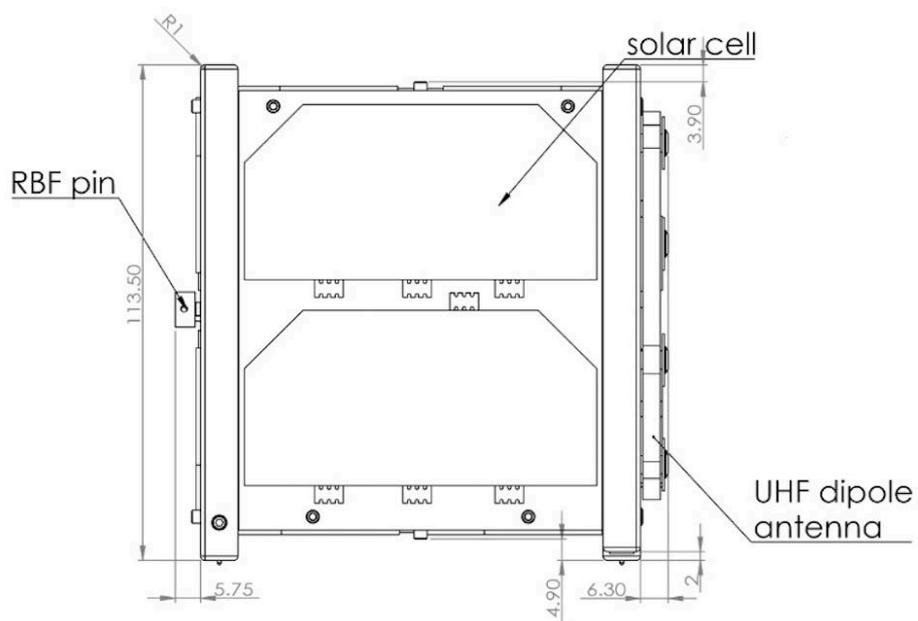


図 19 -Y 軸から見た BIRDS-3 の外観図

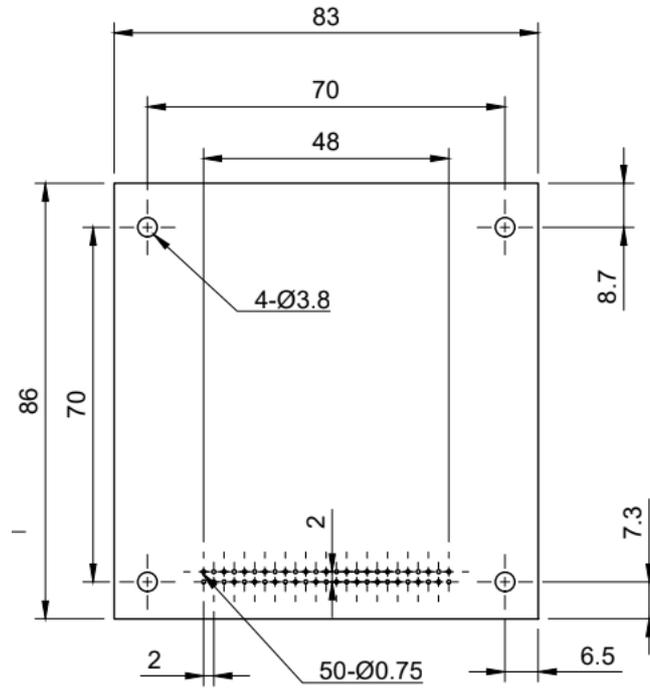


図 22-1 FAB サイズデータ

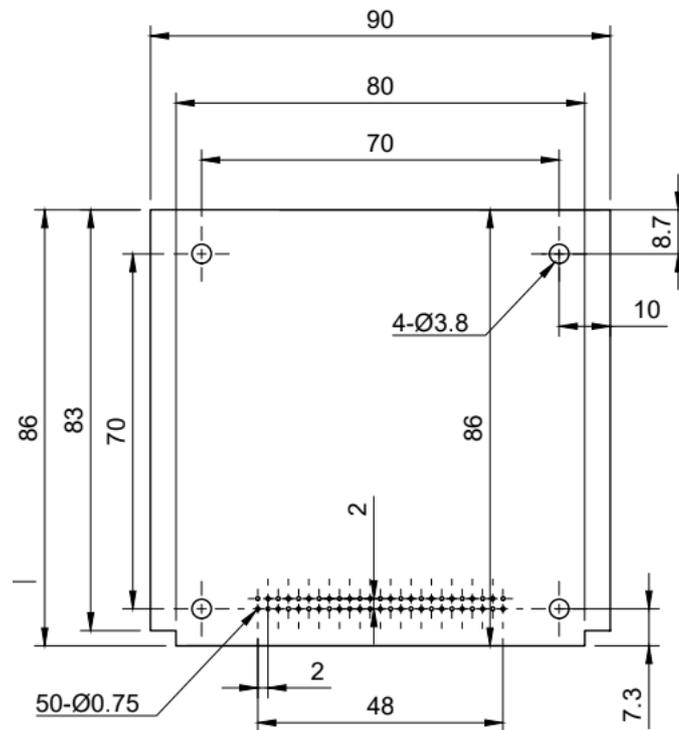


図 22-2 OBC サイズデータ

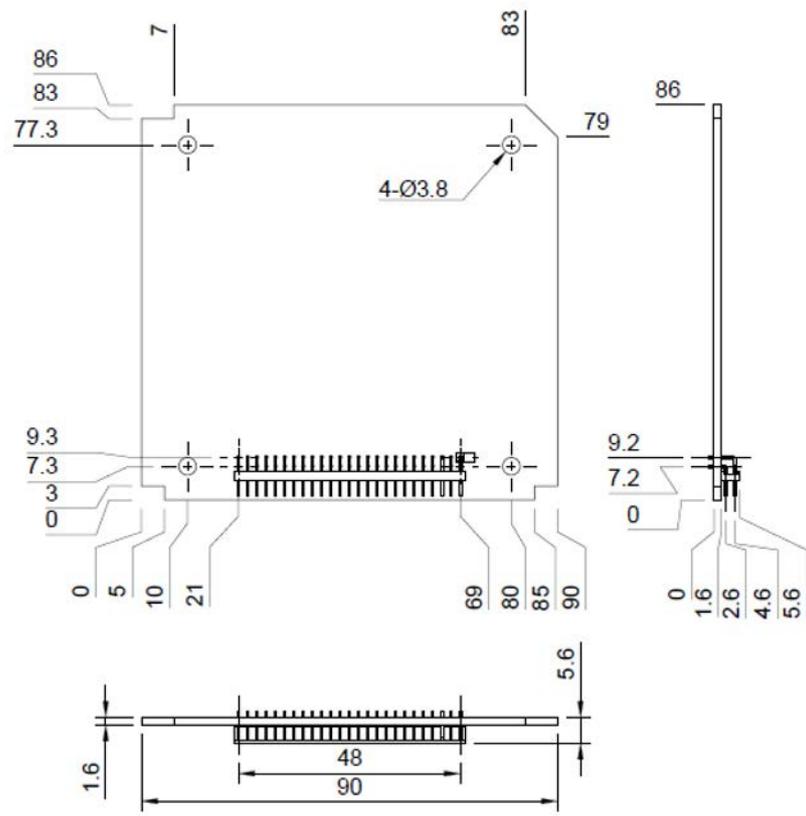


図 22-3 ミッションボード サイズデータの例

c. バス部とミッション機器間のインターフェース

BIRDS バスは、バスシステムとミッションシステム間のさまざまなインターフェースをサポートしている。ただし、伝送速度はそれほど速くはない。単純なシリアルインターフェース、共有フラッシュメモリ、およびデジタル入力/出力 (DIO) 信号のみがインターフェースでサポートされている。

- 共有フラッシュメモリ

共有フラッシュメモリは 1 [Gbit]である。データ共有用のマルチプレクサに接続されている。マルチプレクサは、ミッションシステムが大量のデータを送信する必要があるときに、Main PICがミッションシステムへのパスを変更することによって制御される。共有フラッシュメモリには専用の信号線があり、これらの信号線を他の目的に使用することはできない。

- UART シリアルインターフェース

シンプルな UART シリアルインターフェースは、バスシステムとミッションシステムの間で構成される。11本の信号線がインターフェースに割り当てられている。すべての信号ラインが UART シリアルインターフェースに設定されている場合、5つの UART チャンネルを使用できる。

- SPI シリアルインターフェース
11本の信号線は、SPI シリアルインターフェースにも構成されている。すべての信号ラインが SPI シリアルインターフェースに設定されている場合、2つの SPI チャンネルが使用可能である。
- デジタル入力/出力 (DIO)
11本すべての信号線が DIO 信号に使用されている場合、11本の DIO チャンネルが使用可能である。

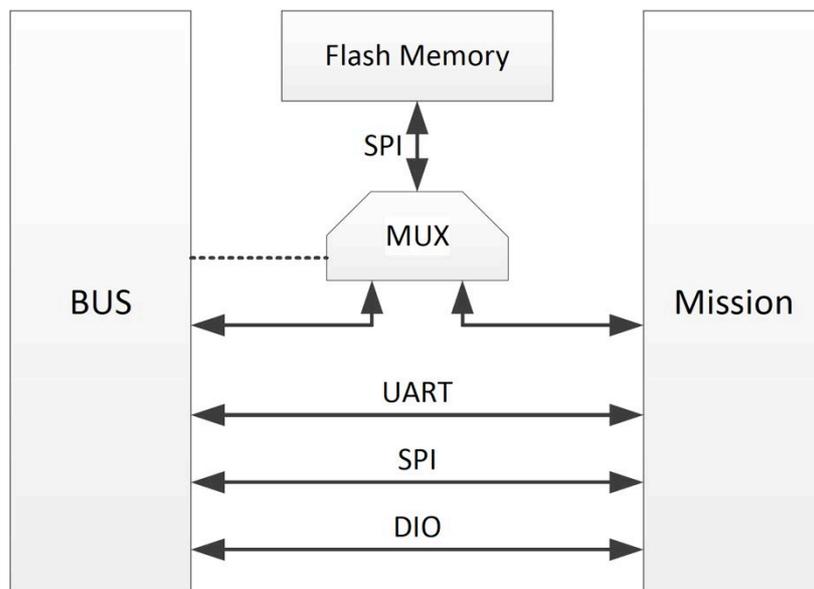


図 23 バスシステムとミッションシステム間のインターフェースブロック図

d. システム統合

キューブサットプロジェクトでは、サブシステムを衛星システムに統合する際に多くの問題が発生する。各サブシステムの独立した試験中には適切に動作しても、衛星を組み立てて統合すると、システムとして機能しない場合が多々ある。システム統合の問題を解決するために、次のような注意が必要である。

- サブシステム間の明確なインターフェース設計
サブシステムは、他のサブシステムとの不明確なインターフェースを持つことがある。サブシステムの開発と試験は、多くの場合、独自の機能に重点を置いている。インターフェースは、最初の設計でチェックする必要があり、サブシステムが組立、統合および試験 (AIT) 段階に進む前に試験する必要がある。
- 独立したサブシステム監視チャンネルを排除
多くのサブシステムは独自の監視チャンネル、通常は UART シリアルチャンネルを使用して、AIT の最後の瞬間でもサブシステム内部をモニタする。独自の独立した監視

チャンネルを備えたサブシステムは、実際の動作条件を忘れがちであるため、フライトモデルの AIT の後に問題を引き起こす。典型的な例は、実際のコマンドおよびテレメトリ操作にモニタ機能がないことである。モニタチャンネルを維持することは非常に便利であるため、サブシステム開発者はそれらを永久に使用したがる。しかし、キューブサットが軌道に放出された後は、独立のモニタラインは使用できない。衛星の状態モニタに利用できる衛星からのデータはテレメトリデータのみである。サブシステムの検証に利用できる衛星へのコマンドは、アップリンクコマンドのみである。したがって、AIT の最後の瞬間にすべてのモニタチャンネルを切断し、衛星が実際に軌道にあるときと同じ方法で地上局と通信サブシステムを使用して衛星をモニタすることを強く推奨する。

- 作業用のドキュメントに従う
すべての AIT 作業は、一部のプロジェクトメンバーの経験や憶測に従うのではなく、文書化されたマニュアルを使用して厳密な手順に従う必要がある。すべての試験結果を文書化し、すべてのプロジェクトメンバーと共有する必要がある。
- 長期間の動作試験を実行する
バグのないシステムはなく、デバッグは開発作業で避けられない。しかし、デバッグには、長期間の動作試験が不可欠である。そのため、キューブサットを実際の軌道上と同じ状態に保つことを強く推奨する。この動作試験では、展開後の最初の数週間を模擬し、デバッグは運用スケジュールに従って実行する必要がある。また、外部電源も実際の軌道上の電力条件に従う必要がある。

参考文献

[5-1] Turtogtokh Tumenjargal, Sangkyun Kim, Hirokazu Masui, Mengu Cho, "CubeSat bus interface with Complex Programmable Logic Device", *Acta Astronautica*, Vol. 160, July 2019, 331–342.

6.地上セグメント

地上セグメントあるいは地上局は衛星との通信用に設計された陸上の無線局である。無線局は通常、VHF帯からX帯の電波を送受信することによって衛星と通信を行う。地上部が衛星と電波の送信もしくは受信に成功することで通信網が確立する。キューブサット地上部は主に八木宇田アンテナを用いてVHF帯、UHF帯を使用する。衛星がS帯のようなUHF帯より高い周波数を使用する場合は、パラボラアンテナを使用することが多い。静止衛星を除き、地上局が衛星と通信を行う際は、地上局のアンテナに衛星を追跡する機能を備える必要がある。地上部の主な目的は、テレメトリデータとアップリンクコマンドによって衛星を運用することである。そして、ミッションシステムのペイロードデータも地上に送信される。

典型的なキューブサットの地上局は図23のように構成されている。アップリンク実施中はデジタルデータはまずTNCに送られる。TNCはモデムとして機能する。TNCによってデータはベースバンド信号に変調される。ベースバンド信号は無線機でキャリア帯域信号と混合される。混合されたRF信号はアンテナから衛星に送信される。ダウンリンクの場合は、RF信号を送信する場合の逆のプロセスになる。RF信号はアンテナで受信され、無線機に流れる。受信したベースバンド信号は、復調を行うためにTNCに送られる。TNCでデジタルデータに復調される。

地上局の多くは、より高いゲインを得るために指向性アンテナを使用する。指向性アンテナでは、方位角と仰角に応じてアンテナを回転させるために衛星の追跡をする操作が必要である。衛星の位置はNORADのTLEを使用したSGP4アルゴリズムで計算される。Orbitronのようなソフトウェアは方位角と仰角を計算し、アンテナを回転させる。角度のデータはコントローラーに伝送され、アンテナを回転させ、衛星を追跡する。

ここでは、BIRDS地上局を例として、典型的なキューブサットの地上局を紹介する。BIRDS地上局ではTNCにKantronixのKPC9612、通信機にiCOMのIC9100を使用している。アンテナは通常の八木宇田アンテナを使用し、建物の屋上に設置することでRF信号への障害物を避けている。



図 25 KPC9612+, Kantronix

表 3 KPC9612+の仕様

物品	特徴	
通信機 ポート 1	データレート	1200 [bps](初期設定), 300, 400, 600
	変調	1200 [bps] FSK full duplex CCITT
	音声出力レベル	1 [mV] p-p から 4 [V] p-p まで調整可能
	出力インピーダンス	600 [Ohm], AC 結合
	オーディオ入力感度	5 [mV] p-p
	入力動作範囲	> 70 [dB]
	入力インピーダンス	不安定, 10 [kOhm]
通信機 ポート 2	最大オーディオ入力	±12 [V] dc, 35 [V] p-p 正弦波
	データレート	4800, 9600, 19200, 38400 [bps]
	変調	帯域幅が 0.3, 0.5, または 全てのガウスフィルター処理された DFSK
	音声出力レベル	2 [mV] p-p – 100 [mV] p-p, J20 off 80 [mV] p-p – 4 [V] p-p, J20 on
	出力インピーダンス	600 [Ohm], AC or DC 結合
	オーディオ入力感度	低: 15 [mV] – 200 [mV] p-p, J16 on 高: 80 [mV] – 2.0 [V] p-p
	入力動作範囲	> 20 [dB], either range
概要	入力インピーダンス	Unbalanced, 10 [kOhm]
	最大オーディオ入力	±25 [V] dc, 25 [V] p-p 正弦波
	運用モード	Packet, KISS, XKISS, HOST, GPS, PAGING, MODEM
	通信プロトコル	AX.25 Levels 1 and 2 (選択可能)



図 26 IC-9100M,iCOM

表 4 IC-9100M の仕様

General	周波数範囲	500 [kHz] – 29.9999 [MHz] 50.000[MHz] – 54.000 [MHz] 144.000[MHz] – 146.000 [MHz] 430.000[MHz] – 440.000 [MHz] 1260.000[MHz] – 1300.000 [MHz]
	モード	LS バス B, CW, RTTY, AM, FM, DV
	アンテナインピーダンス	50 [Ohm]
	アンテナ結合	3つのタイプ M コネクタ - 2つの HF/50-[MHz] コネクタ - 1つの 144-[MHz] コネクタ 2つのタイプ N コネクタ - 1つの 430-[MHz]コネクタ - 1つの 1200-[MHz]コネクタ
送信機	周波数の安定性	±0.5 ppm
	Resolution of freuency	1 [Hz]
	送信出力	1.9 – 50 [MHz] 範囲 SSB/CW/RTTY/FM/DV: 100 – 2 [W] AM: 30 – 2 [W]
	変調	144/430 [MHz] 範囲 SSB/CW/RTTY/FM/DV: 50 – 2 [W] 1200 [MHz] 範囲 SSB/CW/RTTY/FM/DV: 10 – 1 [W]
受信機	受信タイプ	SSB, AM, FM, DV
	Intermediate Frequenc	Double Super Heterodyne (1200-[MHz] band: Triple Super Heterodyne)
	Y	1st IF: 64.455 [MHz] (HF/50-MHz band) 10.850 [MHz] (144-MHz band) 71.250 [MHz] (430-MHz band) 243.950 [MHz] (1200-MHz band)
		2nd IF: 36 [kHz] 10.950 [MHz] (1200-MHz band) 3rd IF: 36 [kHz] (1200-MHz band)

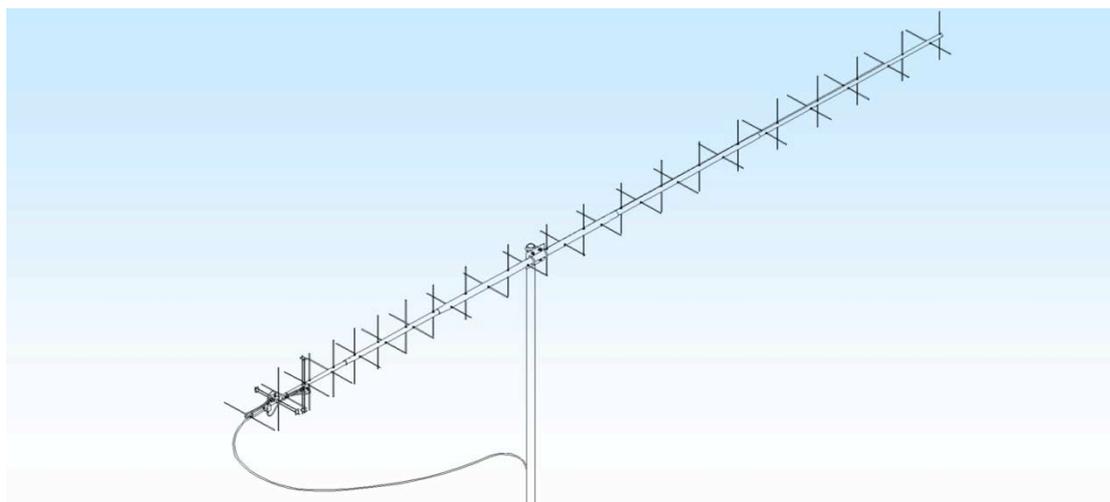


図 27 BIRDS 地上局八木宇田アンテナ, 436CP42UG, ©M2

表 5 436CP42UG の仕様

物品	特徴
周波数範囲	430 – 438 [MHz]
利得	18.9 [dBic]
ビーム幅	21° 回転
フィードタイプ	折り返しダイポール
フィードインピーダンス	50-[Ohm] 不安定
最大定在波比	1.5 : 1
入力コネクタ	タイプ N メス端子
使用電力	1 [kW]
風域	0.19 [m2]
重さ	3.4 [kg]
分極	円形

BIRDS 地上局はコントローラーを使って PST2501 アンテナローテータを回転させる。



図 28 PST2501 ローテータとコントローラー

表 6 PST2501 の仕様

物品	特徴
最大風荷重面積	2.5 m ²
静止トルク	294 [Nm]
回転トルク	196 [Nm]
最大垂直荷重	650 [kg]
モーター電圧	12 [V] dc
回転範囲	500° (70 + 360 + 70)
回転速度	- 90 [sec] for 360°
読み取り制度	- 1 [%] no backlash
アンテナ Mast OD	48 – 50 [mm]
動作温度範囲	-40 – 60 [°C]

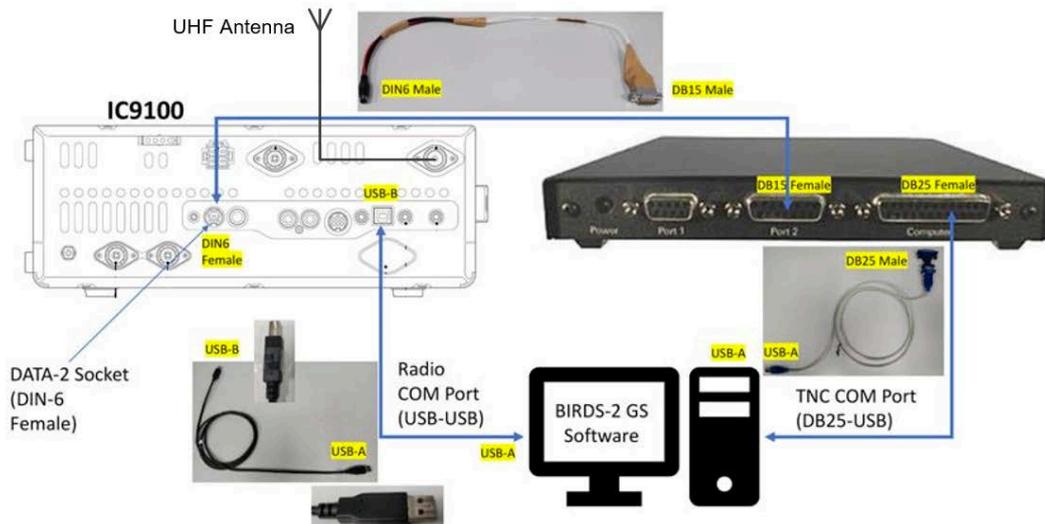


図 29 BIRDS 地上局の接続ダイアグラム

図 28 に TNC, 通信機, 及び PC の接続を示す。IC9100 と KPC9612+ は PC のシリアル COM ポートに接続する。しかし、シリアル COM ポートは PC の一般的なインターフェースではない。物理的な USB コネクタとの接続を行うために、仮想ポートが必要とされる。BIRDS プロジェクトでは、アップリンクとダウンリンクの両方向の通信に 430MHz 帯域の UHF 周波数を使用する。IC9100 通信機の後ろにある Type-N コネクタを使用し、屋上に設置されたアンテナに接続している。IC9100 とアンテナ間のケーブルは信号損失を最小限に抑えるためにできる限り短くする必要がある。



図 30 屋上アンテナ

7.データ分析セグメント

地上セグメントは衛星ミッションシステムのペイロードデータを受信するが、それは生データのみである。キューブサットは比較的低速のデータ伝送リンクを使用しており、データには多くのエラーが含まれる。データ分析セグメントがペイロードデータを取得した後、ミッションセグメントの貴重な情報を得るためには次のようなプロセスが必要である。

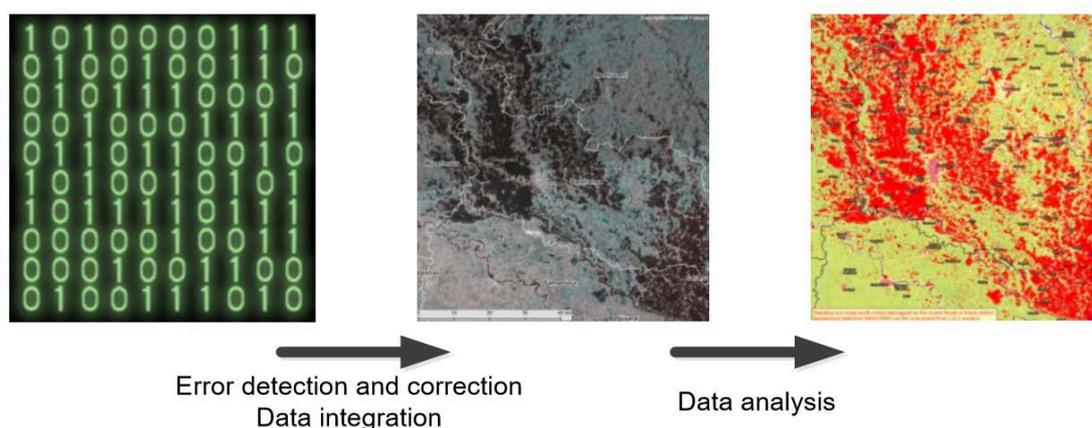


図 31 データ分析の過程© reliefweb

<https://reliefweb.int/map/india/india-mapping-inundation-extent-bihar-using-esa-sentinel-1-satellite-data-20-august-2017>

エラーの検出と修正

一部が欠落したデータや、送信エラーによって誤ったデータなどがある。そのため、エラーを検出し、データを再送信する必要がある。巡回冗長検査(Cyclic Redundancy Check, CRC)は、生データの偶発的な誤りを検出するために一般的に使用されるエラー検出コードである。内容の多項式除算の余りに基づく CRC コードによって、データブロックに短いチェック値が付加される。データを取得すると、CRC コード計算が繰り返され、2つの値が一致しない場合、データの破損が確認できる。もう一つ有名なエラー修正方法は、リードソロモンエラー修正コードである。

データ統合

ミッションデータは通常、パケットでダウンリンクされる。各パケットは、データセット全体の一部にすぎない。データを分析する前に、適切な形式で再構築する必要がある。メモリと送信時間を節約するために、ダウンリンクされたデータは、JPEG などの圧縮形式であることがよくある。再構築の小さなエラーでも、後のプロセスで深刻な問題を引き起こす可能性がある。

データ解析

送信されたデータは、解析する必要がある生データである。ユーザーは簡単なデータ解析を短時間で行うことができる。ただし、データ量が多く、データが非常に複雑な場合は、専用のソフトウェアを開発する必要がある。実際、このデータ解析は、現在のキューブサットプロジェクトの最大の難所である。多くのプロジェクトは、明確なデータ解析計画なしで開発を行い、試行錯誤によって作業を行っている。限られた時間内に貴重なミッションデータを抽出するためには、明確でよく整理されたデータ解析計画が不可欠である。

8.衛星運用

キューブサットは図 32 に示すように、低軌道で 1 日に数回地上局を通過する。衛星が地面に近いと通信がとても困難になるため、運用パスは、最大仰角によって決定される。通常、低軌道衛星では 1 日に 3～5 回の運用が可能である。

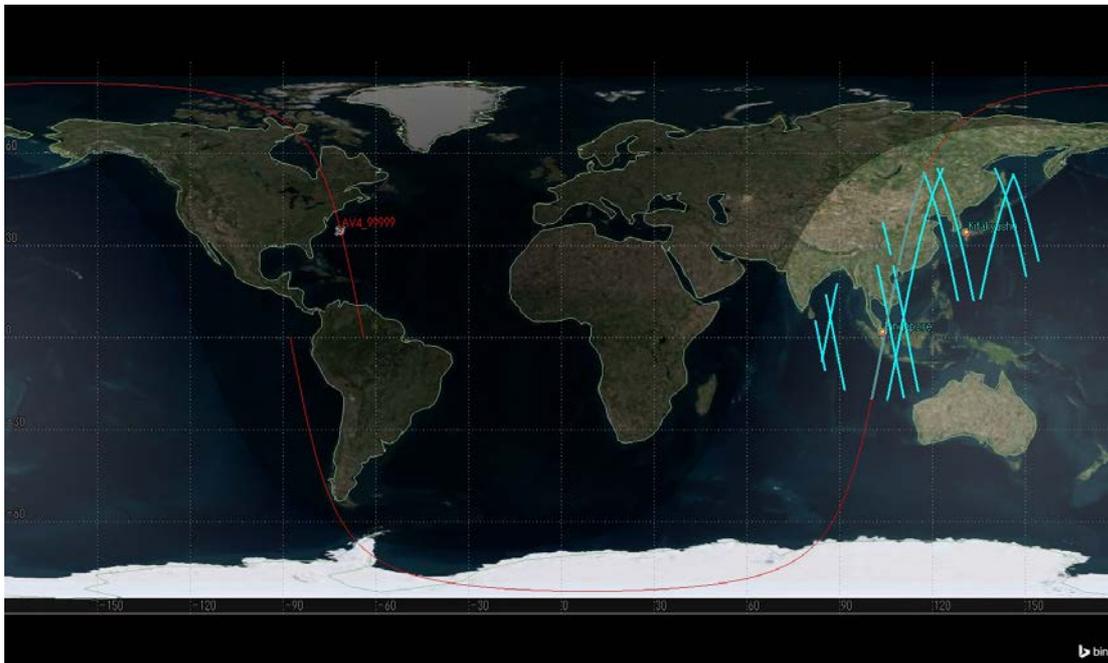


図 32 2つの地上局による衛星パス

水平線から衛星が現れ、信号を取得できるようになると、運用が開始される。これは AOS (Acquisition Of Signal) と呼ばれる。衛星が地平線を通り、信号の取得が不可能になると、運用は終了する。これは LOS (Loss Of Signal) と呼ばれる。低地球軌道 (LEO) の衛星の場合、運用時間は数分から 20 分未満である。この短い時間内に、オペレーターは最初に衛星信号をチェックし、基本的なテレメトリデータを取得して衛星の状態をチェックする。その後、オペレーターはミッションペイロードのデータを取得し、運用計画に従ってコマンドを衛星に送信する必要がある。

オペレーターが運用中に衛星で発生した異常を検出するためには、衛星の基本的な知識が必要である。通常、衛星には一定の自律安全機能があるが、それだけでは必ずしも十分ではない。衛星が搭載機器の故障や誤動作によって異常が発生している場合、適切な動作を行うことはできない。操作ミスは致命的な場合があり、衛星の故障につながる。オペレーターは十分なトレーニングと経験が必要である。

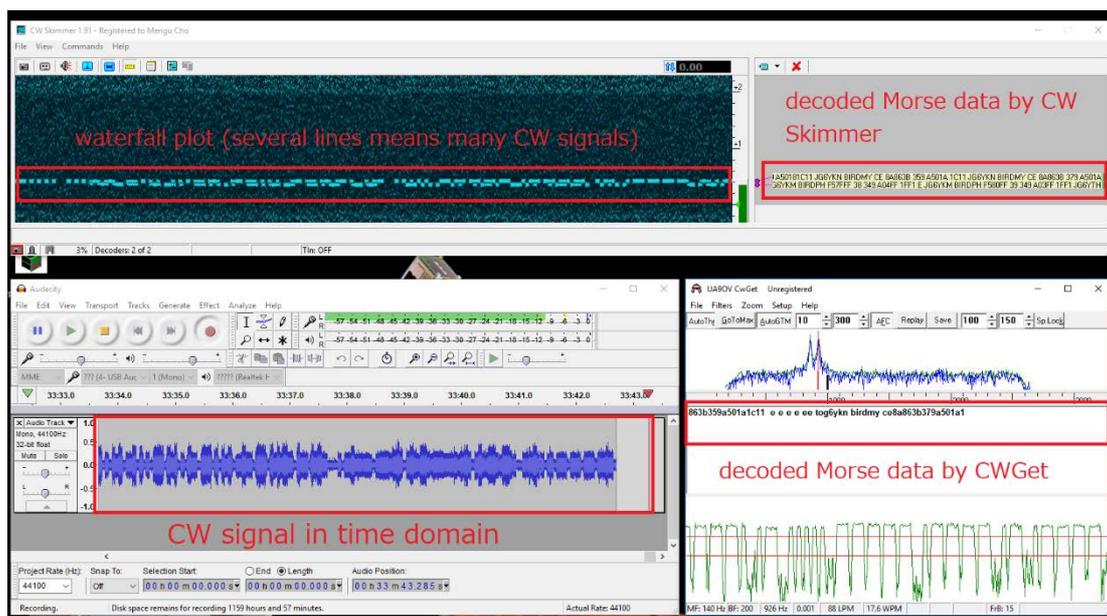


図 33 CW 解析ソフトウェア(CW Skimmer と CwGet)

多くのキューブサットはビーコンに CW を使用し基本的な衛星情報を送信する。CW は、一定の振幅と周波数の電磁波であり、ほとんどの場合、正弦波である。これは、正弦波の搬送波のオンとオフを切り替える初期の無線伝送方法に付けられた名前である。通常、情報は、モールス符号による長音と短音の組み合わせで伝送される。BIRDS 地上局は、CW 情報を取得するために CW Skimmer と CwGet の 2 種類のソフトウェアを使用する。通常、運用は CW ビーコンをキャッチすることから始まり、周波数変調 (FM) 通信を利用した次のステップを行う。

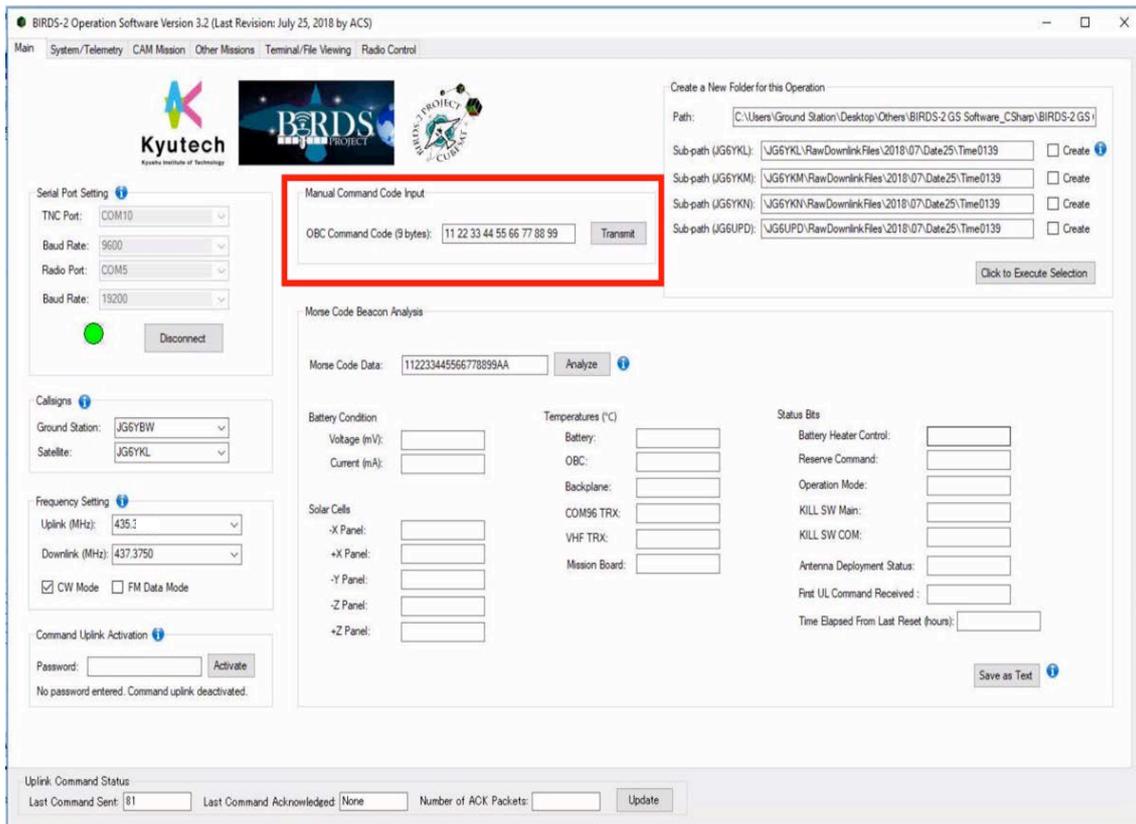


図 34 BIRDS プロジェクト地上局(Uplink)

基本的に、シリアル端末は、衛星にコマンドを送信したり、TNC およびトランシーバーを介して衛星からデータを取得したりするために使用される。ただし、シリアル端末を使用して操作するのは非常に不便である。通常、オリジナルで作成されたソフトウェアを使用して、アップリンクコマンドを送信し、データをダウンリンクする。図 34 は、アップリンクコマンド用の BIRDS プロジェクトの地上局ソフトウェアを示している。図 35 に示すように、同じソフトウェアでデータダウンリンクと基本的なデータ解析を行うことが可能である。

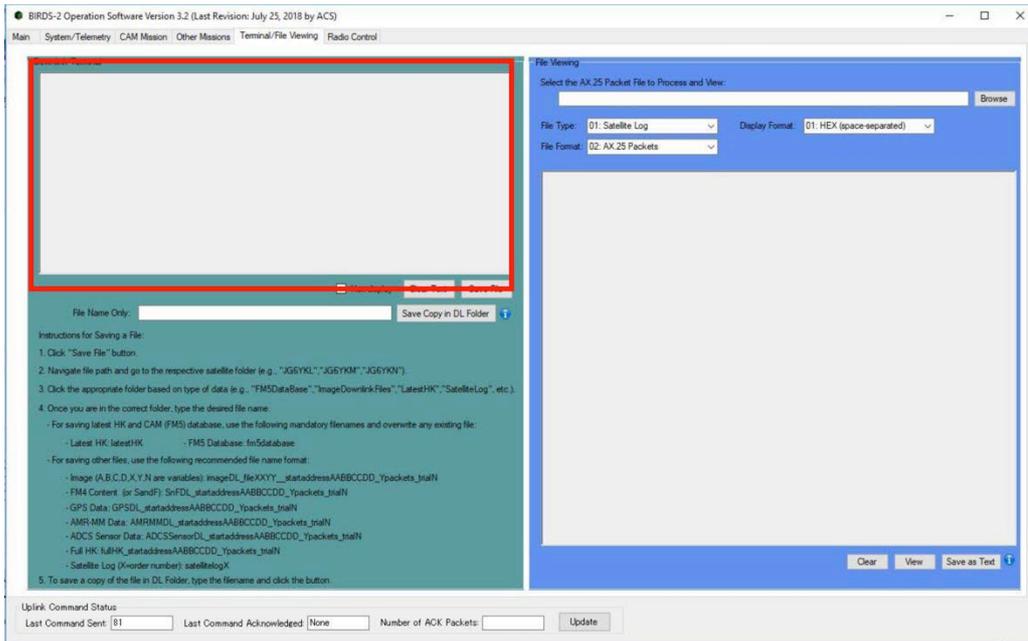


図 35 BIRDS 地上局ソフトウェア-データ取得と解析

衛星の追跡のためにもオリジナルのソフトウェアが必要である。ローテータの制御には様々な種類のソフトウェアを使用することができる。BIRDS 地上局では SatPC32 ソフトウェアを用いている。

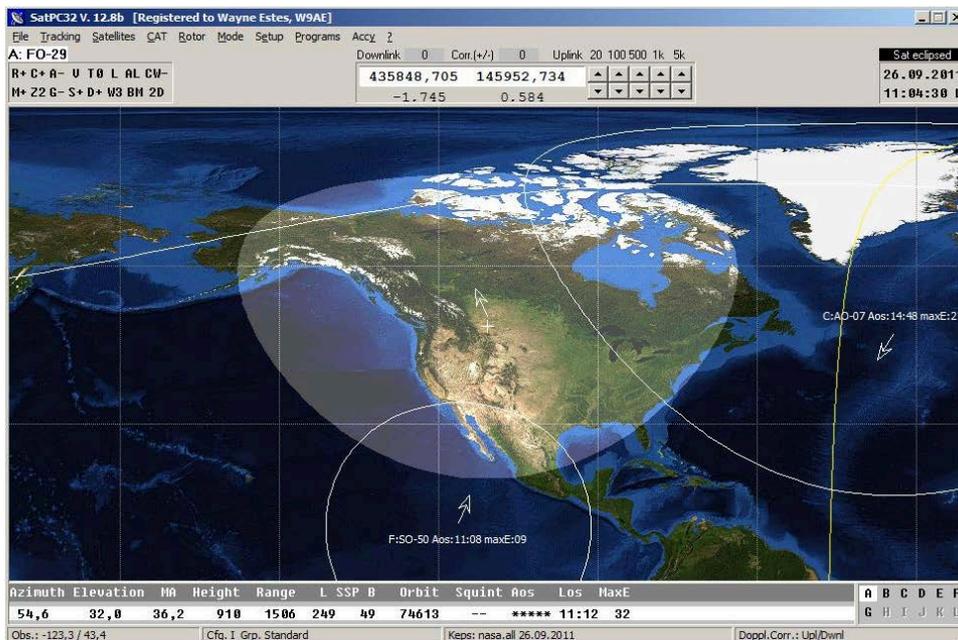


図 36 SatPC32 による衛星追跡制御

9.国際周波数調整と無線免許

衛星が通信に無線周波数を使用する場合、その周波数を使用するには免許が必要である。無線周波数は限られた資源である。無線周波数の使用は、国を通じてユーザー間で調整する必要がある。衛星通信の周波数は自由に使用することができない。地上での通信が許されている周波数であっても、衛星通信で使用できることを意味しない。衛星通信に使用される周波数の使用には、国内当局の許可が必要である。衛星通信は地上の広い範囲をカバーしている。したがって、国境を越えて有害な電波の干渉が発生する可能性がある。そのため、国内の規制を遵守することが重要であると共に、周波数の使用も国際的に承認されている必要がある。

国際周波数調整は、国際電気通信連合 (ITU) によって管理されている。ITU は国連 (UN) の専門機関であり、情報通信技術に関連する問題を担当している。ITU は、個人、企業、またはその他の認可されていない機関と直接的なやり取りは行わない。連絡の相手は政府機関に限定されている。日本の場合、総務省 (MIC) が ITU と連絡する政府機関である。図 37 は、国際周波数調整の大まかな手順を示している。日本における小型衛星の国際周波数手続きについては、以下の資料が詳しいので、参照することを勧める。

- 小型衛星通信網の国際周波数調整手続きに関するマニュアル

(<https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/freq/process/freqint/001.pdf>)

国際調整は、事前公表資料 (API) が ITU に提出されると開始される。日本では、ユーザー (衛星網構築者) が最初に API 原案を MIC に送る。日本では、ユーザーの提供情報を元に MIC が紹介するサポート企業の支援を受けて API 原案を作成することもできる。MIC は API 原案をチェックし、チェック後の API を ITU に送る。ITU は API をすべての国に公開し、API にリストされている周波数が有害な干渉の可能性があると考えた国は、ITU にその旨通告する。これらの通告は ITU から、MIC にフィードバックとして送られる。ユーザーは、さらに調整するためにそれらの通告に答え、MIC を介して再度 ITU に回答を送る必要がある。調整が完了すると、周波数の使用がマスター国際周波数登録 (MIFR) に登録され、ITU によって情報が公開される。ITU が世界中からの通告を処理することに非常に長い時間がかかるため、これらの手順にはかなりの時間がかかる。したがって、プロジェクトの初期段階で周波数申請を開始する必要がある。

周波数申請の全てのドキュメントには、それぞれオリジナルの形式がある。API では、ドキュメントを適切に生成するために特定のソフトウェアが必要である。次の URL は、各機関の HP アドレスである。

- JARL: <http://www.jarl.org/>
- IARU: <http://www.iaru.org/>
- JAMSAT: <https://www.jamsat.or.jp/>
- MIC: <http://www.telesoumu.go.jp/>

- ITU: <https://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>

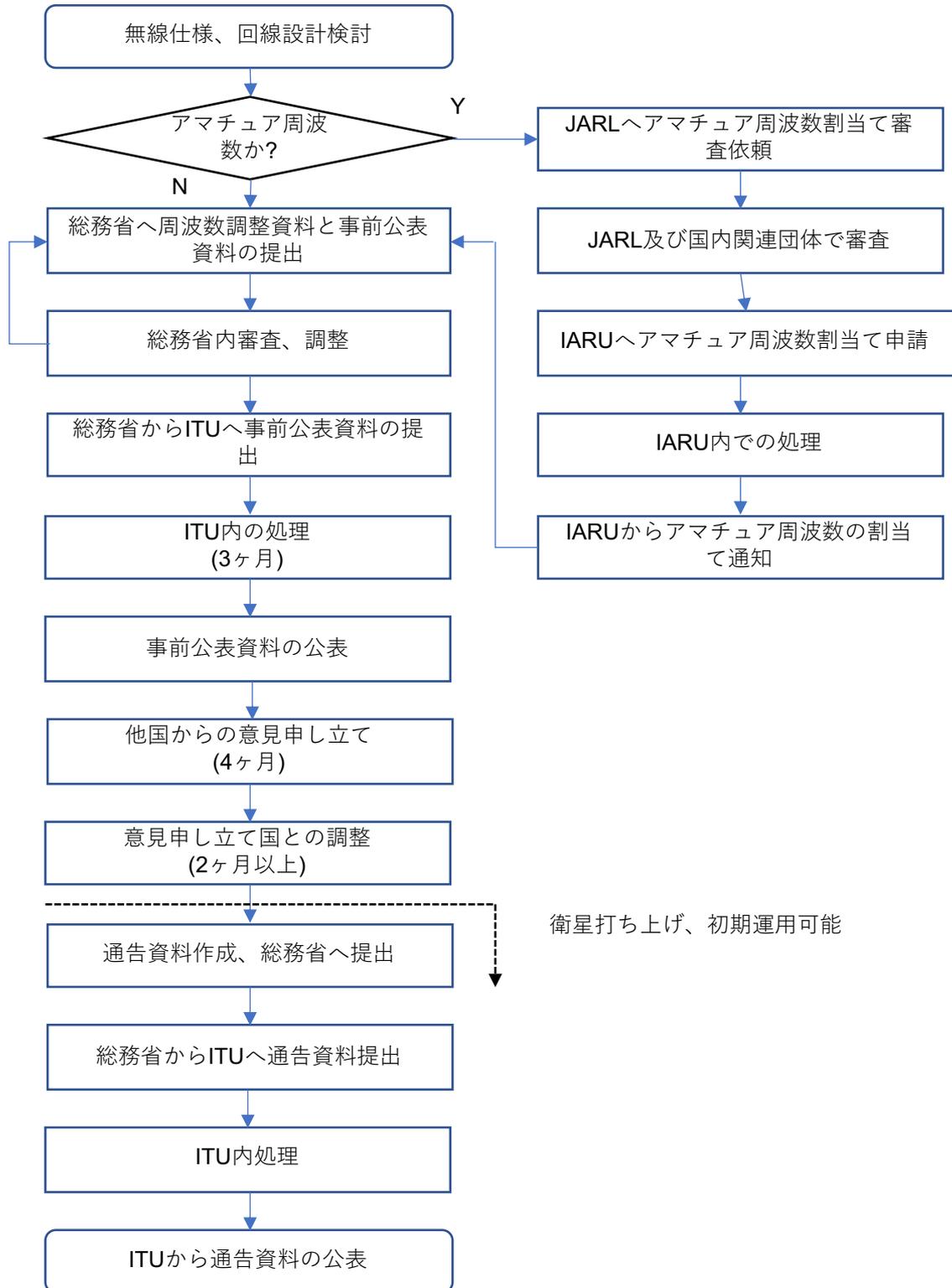


図 37 周波数申請の大まかな流れ

多くのキューブサットはアマチュア無線コミュニティと協力してアマチュア衛星通信用周波数を使用している。アマチュア無線とは、日本の場合、「金銭上の利益のためでなく、専ら個人的な無線技術の興味によって自己訓練、通信及び技術的研究の業務を行う無線」と法律によって定義されており、アマチュア衛星通信を行うためには、総務省からアマチュア無線免許およびコールサインを取得する必要がある。他国の場合も同様に定義されている。この法律に定められた範囲を逸脱してアマチュア衛星通信用周波数を使用することはできない。そのため、以下のような制限がある。ただし、ここに書かれている制限が全てを網羅しているわけではない。

- ・ 衛星がアマチュア衛星通信用周波数を使用した商用ミッションは認められない。
- ・ 衛星のミッションはアマチュア無線コミュニティの精神に基づく必要があり、コミュニティに貢献する必要がある。科学実験だから、あるいは大学衛星だから、という理由でアマチュア衛星通信用周波数帯が使えるわけではない。
- ・ コマンドアップリンクを除き、暗号化された通信を行うことはできない。
- ・ 一つの衛星にアマチュア衛星通信用周波数帯を使うミッションと非アマチュア衛星通信用周波数帯を使うミッションが混在する場合、それらは明確に用途別に切り分けられないといけない。例えば、船舶からの通信を上りリンクでは非アマチュア衛星周波数を、下りリンクでアマチュア衛星周波数を用いて行うことはできない。アマチュア衛星周波数帯を使って、非アマチュアミッションのために衛星を制御するコマンドアップリンクを行ったり、非アマチュアミッションのデータのダウンリンクを行ったりしてはいけない。その逆も同様である。
- ・ 他のアマチュア無線家も通信に参加するため、特殊なデバイスや通信仕様ではなく、一般的な無線通信方式の使用が推奨される。

以下にキューブサットがアマチュア無線周波数を使用するために無線免許を取得するための一般的な手順を述べる。周波数は、ITU に申請する前に、まず国際アマチュア無線連合 (IARU) によって割り当てられる必要がある。IARU は多くの国に加盟団体がある。たとえば、日本の団体は日本アマチュア無線連盟 (JARL) である。申請書類を IARU に送る前に、JARL に相談する必要がある。日本の場合、事前相談相手として、JARL に加えて、日本アマチュア衛星通信協会 (JAMSAT) も含められるべきである。

IARU への申請には、IARU オリジナルの形式を使用する必要があり、申請書には、ミッション、使用する周波数帯、通信方式、CAD モデル、通信システムのブロック図、通信計画、回線計算、消費電力に関する情報、およびアンテナの放射パターンなどを記載する必要がある。JARL と JAMSAT がそれらの内容に同意すると、申請書 (英文) が IARU に送られる。このプロセスには時間がかかる。この段階で IARU から周波数割り当てを取得するには、通常 3 か月以上かかる。

IARU から周波数調整レターを取得したら、MIC を通じて API を ITU に提出する必要がある。この場合は、MIC が ITU と調整する。API 資料作成には ITU-R によって定められたソフトウェアが必要であり、このソフトウェアは Windows のみでサポートされている。MIC が API を ITU に提出した後に提出資料が変更された場合、国際調整プロセスを最初からやり直す必要があるため、このドキュメントは慎重に作成する必要がある。

Space networks and related software download:

<https://www.itu.int/ITU-R/go/space-software/en>

API ドキュメントを作成するために以下の 4 つのソフトウェアが必要である。

GIMS (contour diagram)

<https://www.itu.int/en/ITU-R/software/Pages/gims.aspx>

SpaceCapture (API document)

<https://www.itu.int/en/ITU-R/software/Pages/spacecap.aspx>

<https://www.itu.int/en/ITU-R/software/Pages/ap7capture.aspx>

SpaceVal (API document)

<https://www.itu.int/en/ITU-R/software/Pages/spaceval.aspx>

SpacePub (API printing)

<https://www.itu.int/en/ITU-R/software/Pages/spacepub.aspx>

API を受け取ってから 3 か月以内に、ITU はすべての国で API を閲覧できるようにし、前述したようなプロセスを経て、ITU での調整が完了する。調整が完了して衛星が打ち上げられた後、ユーザーは衛星軌道情報とともに、衛星と地球局の最終的な通信仕様を提出する必要がある。ITU への通告は、MIC を通じて行われる。通告資料が ITU による評価に合格すると、周波数の利用が MIFR に登録され、通告資料が公開される。衛星情報が MIFR に登録されている場合、Bringing Into Use (BIU) 通知を、MIC を介して ITU に送信する必要がある。BIU は通常、衛星が打ち上げられる日付である。MIFR に登録された周波数使用は、次の調整よりも優先される。特定の国（特定のサービスエリア）において、新しいユーザーによる同一周波数の利用申告を拒否する根拠となる。ただし、申告機関との友好関係が崩れるため、逆の立場になった時に拒否されるリスクが高まる。

国内無線免許の取得は、ITU 周波数調整と並行して行う。日本では、衛星の打ち上げ前に、総務省による衛星および地上局の申請内容に基づいて、予備免許が交付される。予備免許の仕様に基づき、送信機の点検を行う。衛星は打ち上げられた後、まずその予備免許の下で試

験運用する。アップリンクとダウンリンクの通信リンクが確立されたことが確認されると、公式の無線免許が発行される。公式の衛星運用は、公式の国内無線免許が取得された後のみ可能である。「試験運用→免許状の取得→ミッション運用」の流れを守ること。正式な免許状の取得前に「地球撮像に成功した」などとミッションサクセスをリリースすると「違反行為」となるので注意すべきである。

10.打ち上げと軌道上環境

打ち上げ環境

ロケットによる打ち上げは宇宙空間に到達する唯一の方法であるため、衛星は打ち上げ段階の激しい振動と衝撃に耐える必要がある。打ち上げロケットと搭載された衛星は、打ち上げ時に強い音響圧力を受け、構造と機器に高レベルの振動を引き起こす。さらに、ロケットボディが推進システムおよび飛行制御システムと相互作用することで、低周波数の激しい飛行不安定が起きる可能性がある。ここでは、Falcon 9 と Dnepr ロケットブースターの2つの例を使って、打ち上げ環境の例を紹介する。

図 38 と表 7 は、Dnepr ロケットの飛行シーケンスのサンプルである。最終的な軌道によっては、全体の打ち上げシーケンスが数時間続く場合がある。主な振動と衝撃は、音圧、遷音速外乱、エンジンの点火、ステージの分離、フェアリングの展開によって引き起こされるため、リフトオフから数分以内に発生する。

打ち上げ段階では、衛星は次の機械的負荷にさらされる。荷重レベルは、打ち上げロケットによって異なる。

- ・ 静的加速
- ・ 振動
- ・ 衝撃
- ・ 音響

機械的試験では、振動はさらに正弦波振動とランダム振動に分けられる。つまるところ、2つの振動はどちらも POD とロケット構造の間の境界面を介して伝えられる。正弦波振動は、ロケット本体の固有振動モードやエンジンの点火などの外乱による。ランダム振動は、ロケット本体の外部からの音響力によるロケット本体の励振による。キューブサットの場合、POD の表面サイズが非常に小さいため、POD とロケット構造の間のインターフェースを介して直接加えられる振動負荷と比較して、POD に直接かかる音響負荷を無視できる。表 8～11 に、静的加速度、正弦波振動、ランダム振動、および衝撃のレベルをそれぞれ示す。

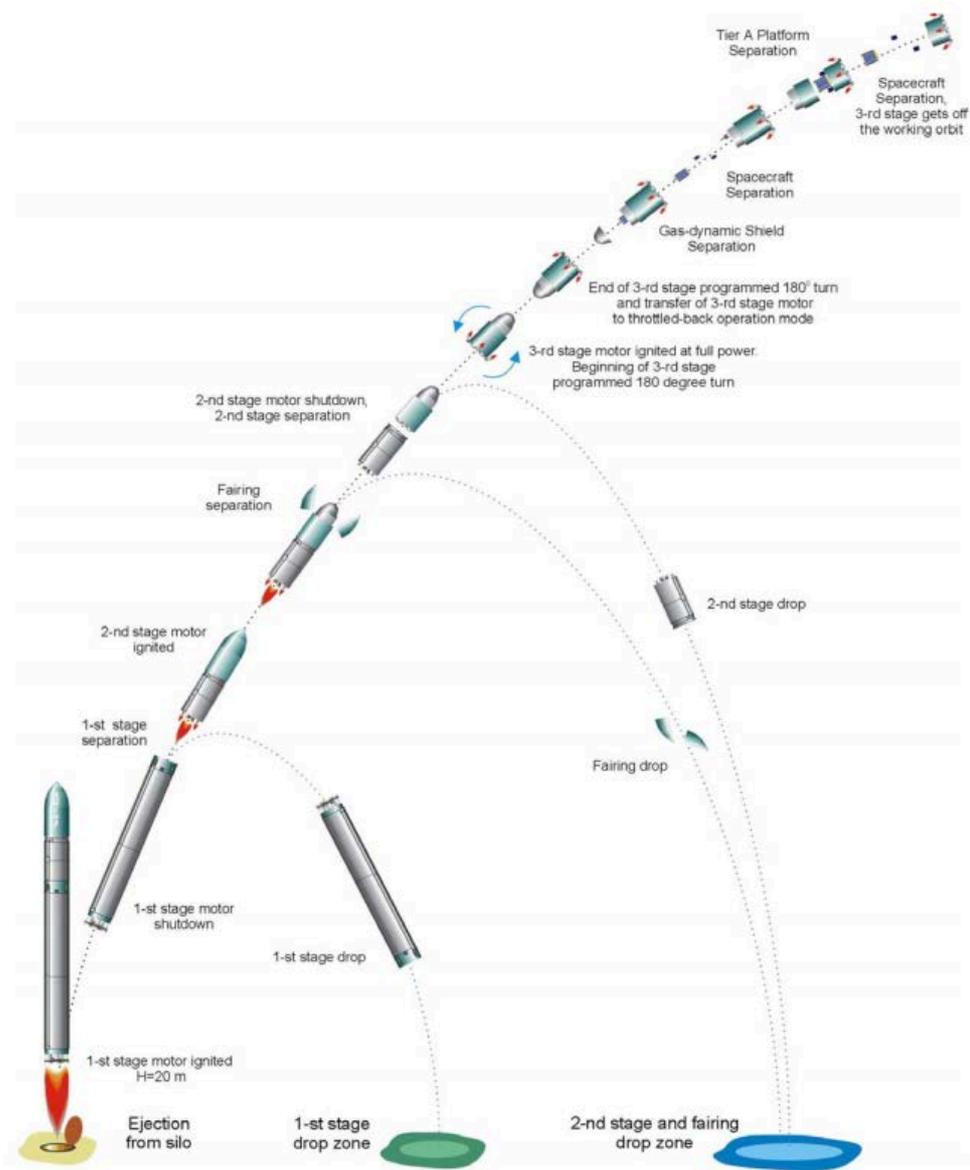


図 38 Dnepr ロケットにおける打ち上げプロファイル, ©Yuzhnoye

表 7 Dnepr ロケット発射サンプル

シーケンス	実施内容
0	高温ガス発生機によるリフトオフ
1	高度 20m での第 1 段階点火
2	第 1 段階燃焼終了
3	第 1 段階分離, 第 2 段階点火
4	フェアリング分離, 第 2 段階燃焼終了
5	第 2 段階分離
6	第 3 段階点火, 180 度回転開始
7	180 度回転終了
8	ガスダイナミックシールド分離
9	宇宙機分離

表 8 Dnepr ロケットブースターの加速荷重

搭載燃料	垂直加速度 [g]	水平加速度 [g]
第 1 段階燃焼	7.5	0.5
第 2 段階燃焼	7.8	0.2
第 3 段階燃焼	-0.3 – -0.5	0.25

表 9 Dnepr ロケットの調和振動の振幅

垂直方向	周波数 [Hz]	5 – 10	10 – 15	15 – 20
	振幅[g]	0.5	0.6	0.5
	継続時間 [sec]	10	30	60
水平方向	周波数 [Hz]	2 – 5	5 – 10	10 – 15
	振幅 [g]	0.2 – 0.5	0.5	0.5 – 1.0
	継続時間 [sec]	100	100	100

表 10 Dnepr ロケットブースターのランダム振動のパワースペクトル密度

周波数 [Hz]	Power Spectral Density Liftoff [g ² /Hz]	Power Spectral Density State Burn [g ² /Hz]
20 – 40	0.007	0.007
40 – 80	0.007	0.007
80 – 160	0.007 – 0.022	0.007
160 – 320	0.022 – 0.035	0.007 – 0.009
320 – 640	0.035	0.009
640 – 1280	0.035 – 0.017	0.009 – 0.0045
1280 – 2000	0.017 – 0.005	0.0045
RMS [g]	6.5	3.6
継続時間 [sec]	35	831

表 11 Dnepr ロケットの衝撃応答スペクトル

搭載燃料	周波数 [Hz]							シヨツク数
	30	50	100	200	500	1000	2000	
	50	100	200	500	1000	2000	5000	
衝撃スペクトル値[g]								
フェアリング分離	5	10	25	100	350			a)
第3段階分離	-	-	-	-	-	1000	1000	
	10	25	100	350	1000			
機体分離	5	10	25	100	350		1000	1
	-	-	-	-	-	1000	-	
	10	25	100	350	1000		3000	

a) SHM に設置された宇宙船の数に応じて、衝撃の影響の数が決まる

軌道環境

ここでは、キューブサットが主に LEO に打ち上げられるため、低地球軌道 (LEO) 環境

について述べる。典型的な LEO の高度範囲は 200 [km] から 1000 [km] である。この LEO には次の特徴がある。

- ・超高真空：高度 960 [km] で 6×10^{-8} [Pa]
- ・温度範囲： ± 100 [°C]
- ・放射線：電磁放射線、重い粒子は極域を除いて陽子が優勢
- ・真空 UV： 10^{-6} [W / m²]
- ・原子酸素：高度 300 [km] ~ 500 [m] で $10^{13} \sim 10^{15}$ AO / (cm² 秒)、約 5 [eV]

キューブサットの軌道上環境でもっとも重要な要素は熱環境と放射線環境である。

LEO では、地上までの距離が近く、衛星から地球を見た見かけ角が大きい。そのため、地球からの赤外放射の影響を受けて、蝕の時間が 20~30 分程度と短いこともあって、蝕に入っても温度が -100°C 近く下がるようなことはそれほどない。ISS 軌道であればなおさらである。一方で、昼間は、地球からのアルベドの影響などもあり、高温側に達しやすい。特に ISS 軌道のような高軌道傾斜角では衛星が地球の影に入らない全日照状態が生まれやすい。その際には、蝕によって温度が下がることがないので、高温での動作、特に常時作動させているような通信機などは注意が必要である。

放射線環境としては、キューブサットの場合はミッション期間が数年程度と短いため、トータルドーズや変位損傷、表面の材料劣化、といった長期的に蓄積するダメージはそれほど問題にならない。重粒子（特に陽子）によるシングルイベントが大事であり、その中でもシングルイベントラッチアップは過電流によるハードウェアの破損やコンピュータのハングアップにつながる可能性があるため、注意が必要である。

11.組み立て、統合、試験

組み立て、統合、試験（AIT）の活動は強く相互に関連しあっており、キューブサットの品質保証と深い関係がある。キューブサット開発の成功はAIT活動によって決まり、AITの最終的な目標は、キューブサットが軌道上でミッションを果たすという信頼を得ることである。

a.組み立て

キューブサットのハードウェアはシステムとして組み立てる必要がある。時として、人々は組み立て作業の役割を過小評価するが、それはキューブサットの信頼性を大きく決定するものである。キューブサットの組み立てには、その品質に自信を持つために以下のことが必要である。

よく訓練されたチーム

組み立て作業には十分な経験が必要であり、訓練で経験を積むことができる。組み立てチームは、実際のフライトモデルの組み立てに入る前に、試験モデル（エンジニアリングモデルなど）を使って何度も訓練を行う必要がある。

組み立て手順

組み立て作業は、メモや書類がなくても行われることがある。最初は時間短縮に見えるかもしれない。しかし、後になって、それは大きな時間のロスと非常に深刻な問題につながる。組み立て作業は、組み立て手順書及びチェックリストに沿って行われなければならない。組み立て作業後は文書を更新し、速やかに全メンバーと共有する必要がある。コネクタの緩み、ハーネスの接続ミス、トルク不足によるボルトの緩み、オーバートルクによる変形など、組み立て時の作業ミスは、最終的な振動試験や打上げなどの重要な局面で顕在化する危険がある。そうなれば、ミッションの失敗だけでなく、致命的な安全上のハザード (Catastrophic hazards)につながる可能性がある。チェックリストは、組み立てが手順通りに行われたかどうかを確認するための重要な証拠となる。チェックリストは、衛星の組み立てにタッチしていない人が、作業を見ながら書かなければならない。チェックリストは、衛星が適切に組み立てられたことを示すために、最終的な安全審査で証拠として要求されることがある。組み立て手順書自体は随時更新される文書であり、試験モデルを使った訓練を通して、手順書が誰にとってもわかりやすいか、実際の手順を反映しているかなどを評価する必要がある。

クリーンルーム

キューブサットの組み立て作業には、クリーンルームまたはクリーンブースが必要で

ある。その部屋やブース内には作業に十分なスペースも必要である。フライトモデルは粉塵から保護されていなければならない。地上では、粉塵は重力によって表面に付着するが、軌道上では浮遊する。それらは衛星上のどこにでも付着し、敏感な機器に損傷を与えたり、電氣的に導電性がある場合には短絡を引き起こしたりする可能性がある。宇宙産業は、半導体産業など他の産業に比べて、清浄度の要求はそれほど厳しくない。一般的な組み立て作業では ISO クラス 8（米国規格クラス 10 万）が最低条件となっており、このような低クラスの清浄度は、クリーンブースであれば実現可能である。清浄度の要求はそれほど高くなくても、人の唾液や汗がフライトモデルを汚さないようにマスクや手袋を着用するなどの配慮が必要である。

整理された道具

すべての道具はよく整理されていなければならない。作業の効率化のために清潔に保たれていなければならない。作業場の安全性を保証することもまた非常に重要である。また、キューブサットの残留磁気モーメントを最小化するために、定期的に道具を消磁することも強く推奨される。

b.統合

統合とは、別々に開発された複数のサブシステムを一つの動くシステムに統合することである。これはハードウェアだけでなく、ソフトウェアでも行わなければならない。統合はキューブサット開発において最も重要な部分の一つであり、開発プロセス全体の中で最も困難な部分でもある。多くの場合、各サブシステムでは問題なく性能仕様を満たしているが、統合後に他のサブシステムと連携しなければならない場合にうまくいかないことがある。そこでは、試行錯誤のプロセスを経て問題点を見つけ出すことが必要である。統合作業の時間ロスを最小限に抑えるためには、以下の項目が必要である。

システムエンジニア

システム的な視点でキューブサットシステム全体を見るために、少なくとも 1 人の専門者を置くことが強く推奨されている。キューブサットプロジェクトでは、常に人材が不足しているため、これは困難なことである。大学のキューブサットプロジェクトでは、プロジェクトマネージャがシステムエンジニアとしても活動することが多いが、プロジェクトマネージャは多くのタスクで縛られていることが多い。システムエンジニアがシステム統合について考え、レビューし、監視するための十分な時間を確保することが推奨される。システムエンジニアは、何が求められているのかを知る必要がある。

Interface Control Document

Interface Control Document(ICD)は、サブシステム間のインターフェースを規定するため

の重要な技術文書である。キューブサットのサブシステムは大型衛星に比べてそれほど複雑ではないため、ICD なしでサブシステムを開発することも可能である。しかし、ICD なしで統合を行うのは非常に危険である。システムエンジニアの重要な役割は、ICD を管理することで、これは、サブシステムを設計した学生がすでに卒業している場合にも、衛星運用中に技術的な詳細を追跡するための重要な技術文書としての役割を果たす。

複数の統合

学生チームは、統合作業の難しさを過小評価し、楽観的なスケジュールを組んでしまうことが多い。システム統合の経験が浅く、経験の浅いメンバーで構成されている場合は、システム統合作業を複数回行うことが推奨される。Critical Design Review(CDR)の前にエンジニアリングモデルの AIT を行うことは、チームメンバーにとって非常に良い練習になる。彼らは経験から多くのことを学び、フライトモデルの AIT に適切な時間を配分できる。

フライトモデルを想定した統合

システムを実際の状態に近い状態に統合する必要がある。多くのサブシステムエンジニアは、統合作業中に、モニタまたは検査用の信号線をサブシステムに含めたいと考えている。それは初期段階では必要だが、後の段階では削除すべきである。キューブサットはその信号線を入れたままでは打ち上げられない。そのため、軌道上に存在するのと同じ条件でシステムを統合すべきである。

c. 試験戦略

人工衛星は一度打ち上げられてしまうと修理ができない。通常、打ち上げ直後には多くの異常や故障が観測される。これらの異常や故障は、軌道上での時間の経過とともに減少し、最終的にはランダムなペースでたまにしか発生しない。初期の異常や故障は、打上げ前に見落とされていたシステムと運用環境のミスマッチによるもので、その後の異常や故障は、放射線の影響などの偶発的な原因によるものである。地上でのキューブサットの試験では、打ち上げ前に原因を特定して初期の異常や故障を減少させ、衛星の致命的な損失につながらないようにすることに重点を置くべきである。試験を重ねれば重ねるほど、軌道上での寿命は増えていく。しかし、永遠に試験を続けることは非現実的でもある。また、試験が多ければ多いほど、時間もお金もかかることになる。求められる信頼性と試験に費やす労力との間に、適切なバランスを見つけなければならない。

ISO-19683 「Space systems - Design qualification and acceptance tests of small spacecraft and units (宇宙システム-小型宇宙機およびユニットの設計認定と受入試験)」では、超小型小型衛星のための最低限の試験要求が記述されている。ISO-19683 は、大学のキューブサットプロジェクトの範囲に合わせてさらに調整することが可能であり、試験戦略を検討するた

めの良い出発点となる。BIRDS プログラムの経験から、以下の試験は本当に必要不可欠である。

1. Electrical interface, functionality and mission test (電氣的インターフェース、機能性、ミッション試験)
2. Electromagnetic Compatibility (EMC) test (電磁適合性 (EMC) 試験)
3. Deployment test (展開試験)
4. Antenna pattern test (アンテナパターン試験)
5. Launcher/Spacecraft interface test (ランチャー/宇宙機のインターフェース試験)
6. Mechanical test (機械的試験)
7. Thermal test (熱試験)
8. Long-range test (長距離通信試験)
9. End-to-end mission simulation test (E2E ミッションシミュレーション試験)

電氣的インターフェースと機能性試験は、統合過程において実施される。チームが一連の環境試験を開始する前に、衛星は少なくともテーブルの上で動作し、すべてのサブシステムと一緒に動作できるようにしなければならない。そうでない場合、環境試験中に見つかった不具合が、衛星の設計の性質によるものなのか、環境ストレスによるものなのかを区別することができない。ミッション試験では、カメラによる撮影がミッション対象の一つである場合、地上局が衛星にコマンドを送信した後、地上局の機器に接続された PC 上で画像を再構成できることを確認する必要がある。コマンドのアップリンクとデータのダウンリンクは、RF またはケーブルで行うことができるが、RF が望ましい。

EMC 試験は、内部素子から発生するノイズが他の搭載素子、特に衛星受信機に影響を与える場合に重要である。アップリンク信号は、衛星に到達したときにはすでに非常に弱くなっている。バックグラウンドノイズレベルが高い場合、S/N 比がしきい値を下回ることがある。衛星受信機の感度レベルは、制御された状況で、おそらく受信機と地上局の無線機（または信号発生器）との間に可変アッテネータを接続することによって、最初に設定する必要がある。衛星が完全に組み立てられた後、アップリンクを受信することができる。無響室内の RF でアップリンクを送信することが推奨される。

多くのキューブサットは展開可能なアンテナを使用しているため、展開の失敗は衛星の損失につながる。多くのアンテナ展開システムは、熱で保持紐を切断するためにニクロム線を採用している。展開試験は、特に最悪の条件、最低温度、最低バッテリー状態を想定して、何度も行う必要がある。ヒンジなどの機械的な部品が使用されている場合は、真空中での試験は機械的な部品に厳しい状況を与える。太陽電池パネルなどの機械的展開デバイスがなく展開アンテナのみの場合、熱サイクルチャンバー内での試験は、空気によってニクロム線の加熱がさらに阻害されるため、最悪の条件を与えるかもしれない。

アンテナパターン試験では、アンテナの放射パターンを測定する。フライトモデルのア

アンテナ利得を測定することが強く推奨される。展開可能なダイポールアンテナやモノポールアンテナ、あるいはパッチアンテナのようなキューブサットアンテナの特性は、最終的な出来栄に強く依存する。見た目が同じであっても、アンテナに電波を放射させて、アンテナが適切に製造されて衛星に取り付けられているかどうかを確認すべきである。

キューブサットの場合、ランチャー/宇宙船インターフェース試験は、POD との適合性を確認することを意味する。JAXA POD の場合、衛星外形寸法の公差は 0.1[mm] である。0.1[mm] より良い精度で構造部品を製作することは難しくない。しかし、組み立て後の衛星が歪んでいる可能性がある。プロジェクトの早い段階で、STM や EM などでのフィットチェックを行うことを勧める。構造設計、製造元、組立手順を修正し、衛星がスムーズに POD に出入りできることを確認する。最終段階で衛星のフライトモデルが POD に入らないと悲劇である。そうなってしまったら、ほとんど何もできず、打ち上げを中止せざるを得ない可能性がある。

安全要求事項に適合していることを示すための検証方法として、機械的試験、特にランダム振動試験が求められている。ロケット打ち上げの場合は、打ち上げ時の機械的負荷に対して衛星の構造強度が十分であることを示すためである。この場合、準静的荷重試験や正弦波振動試験も必要になることが多い。ISS の場合は、ISS への打上げ時の振動で太陽電池などの飛散物が出てこないことを示すための試験も必要である。試験のレベルや条件はランチャーによって異なる。エンジニアリングモデルの段階で打上げ方法が確定していない場合は、ISO-19683 の表 5 を使用することもある。この表にはユニット認定試験要求が記載されているが、POD 内のキューブサットは、より大きな衛星のユニット、すなわち POD とみなすことができる。正弦波振動とランダム振動の試験レベルと条件を表に示す。また表 12、図 40 に九工大の振動加振器を示す。加振器はそれほど特殊なものではない。自動車や電子機器などの試験サービスを提供している試験所で見かけることができる。

表 12 振動試験の試験レベルと期間

試験	項目	仕様
正弦波振動	振動振幅	8.4 [g] p-p or higher
	周波数	5 – 100 [Hz]
	掃引速度 (振動の変化速度)	4 [Oct/min], up and down
	妥当な試験回数	Once for each axis
ランダム振動	二乗平均平方根	13.3 [g] rms or higher
	PSD の許容値下限	0 [dB]
	持続時間	1 [min] for each orthogonal axis
	振動数	20 to 2000 [Hz]
	妥当な試験回数	Once in each axis



図 40. 振動加振器

機械的試験のもう一つが衝撃試験である。衝撃試験が必要かどうかは、ランチャーによって異なる。ISS での放出を選択した場合は、衝撃試験は必要ないが、ロケット打ち上げを選択した場合は、衝撃試験が必要になることもある。ロケットは、打ち上げ時に SRB、ステージ、フェアリング、主衛星が分離することにより、数回の火工品衝撃を発生する。キューブサットの場合は、それ自体の分離による火工品衝撃は存在しない。おそらく、フェアリングの分離が最も高い衝撃レベルを与えることになる。試験レベルや条件はランチャーによって異なる。エンジニアリングモデルの段階でランチャーが固定されていない場合は、ISO-19683 の表 5 を使用することがある。衝撃試験の試験レベルと条件を表に示す。また表 13、図 41 に九工大の衝撃試験機を示す。一般に、他業種で使用されている衝撃試験機は、衝撃加速度の方法が異なるため、キューブサットには適していない。例えば、携帯電話などの電子機器によく使われている落下試験は、衛星から並進運動エネルギーが放出されないため、適切ではない。POD が取り付けられているベースプレートを叩くハンマリング試験は、フライト環境を表現できる試験である。

表 13 衝撃試験のレベルと期間

試験	項目	仕様
衝撃		100 [Hz]: 600 [g] 2500 [Hz]: 4000 [g] 5000 [Hz]: 4000 [g]
	SRS	
	衝撃回数	* This PDS may be tailored according to the test requirements of launch vehicle Once in each axis
	Q factor	10

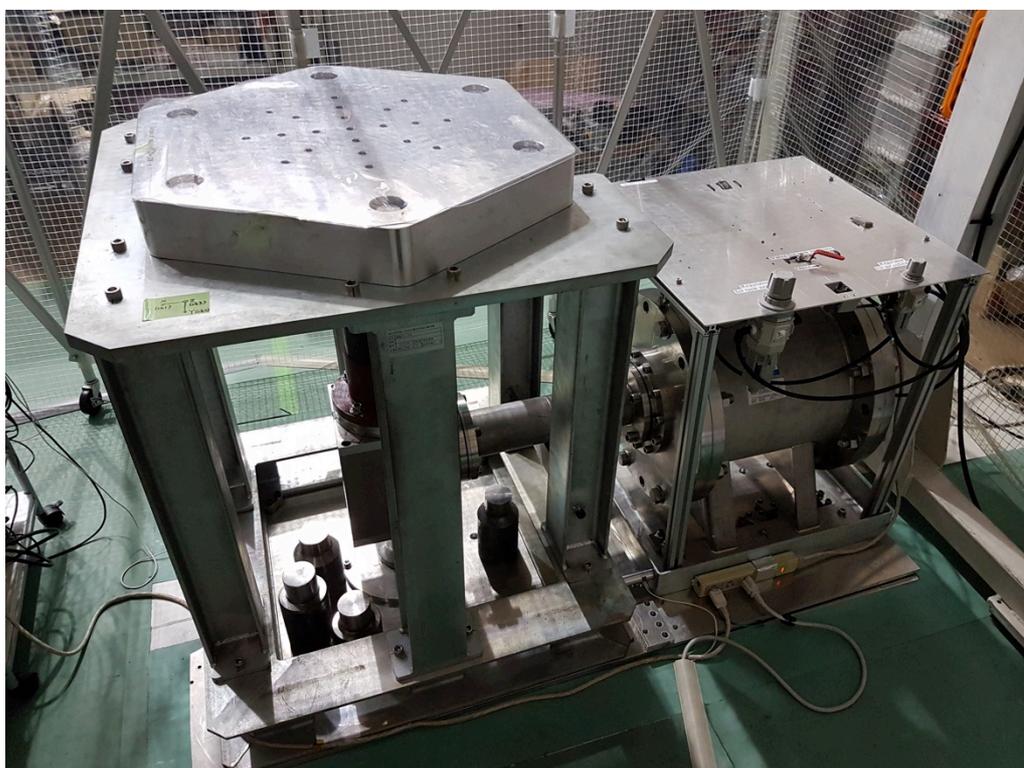


図 41. 衝撃試験機

熱試験は、衛星が軌道上の温度サイクルに耐え、軌道上で予想される温度範囲内で正常に機能することを確認するために行われる。熱真空チャンバーが利用可能な場合は、熱サイクル機能試験と真空機能試験の組み合わせに比べて、フライト環境を表現できる試験となるため、熱真空試験が推奨されている。いずれにしても、衛星内部の温度勾配に問題がないこと、電池などの密閉部品の漏れがないことを確認するために、少なくとも一度は真空環境下で運用する必要がある。また、熱真空試験や熱サイクル機能試験の際には、POD からの

展開直後の極低温や高温でも衛星の電源が入ることを確認するために、コールドスタート試験やホットスタート試験を実施する必要がある。

熱真空試験の温度範囲は、衛星の熱設計、軌道、運用モードに依存する。熱真空試験を開始する前に温度範囲を定義することが必要である。温度範囲を定義する一つの方法は、同じ軌道上の類似の衛星のデータを探すことであり、注目すべきは、多くのキューブサットがすでに ISS 軌道を飛んでいることである。キューブサットの外表面は太陽電池で覆われている。したがって、キューブサットの熱放射特性は多かれ少なかれ同じである。熱解析の精度に自信がない場合は、過去の衛星から得られたデータの方が、信頼性が高い。少なくとも熱解析モデルは、過去の衛星のデータを分析することによって検証されるべきである。ISO-19683 の表 5 には、熱真空試験の試験レベルと条件が記載されている。軌道上の温度範囲について何の手がかりもない場合は、これが良い出発点になるかもしれない。この温度は内部部品の温度であることに注意する必要がある。この試験レベルと条件で衛星がうまく機能しなければ、衛星は軌道上で機能しない。

図 42 は九工大の熱真空チャンバーの写真である。最大 3U のキューブサットを搭載するのに十分な大きさで、液体窒素冷却シュラウドが装備されている。残念ながら、熱真空チャンバーはカタログに載っている製品はなく、常にオーダーメイドで作られており、熱真空チャンバーを調達する場合は、必要な仕様をよく理解しておく必要がある。

表 14 熱真空試験の試験レベルと時間

試験	項目	仕様
熱真空	温度範囲	-15°C – +50°C
	サイクル数	2 or more
	動作中の浸漬時間	1 [h] or longer
	サーマルドエル	1 [h] or longer
	許容制限	3°C
	温度上昇率	±5°C/[min] or slower
	チャンバー圧力	1.0 x 10 ⁻³ Pa or lower

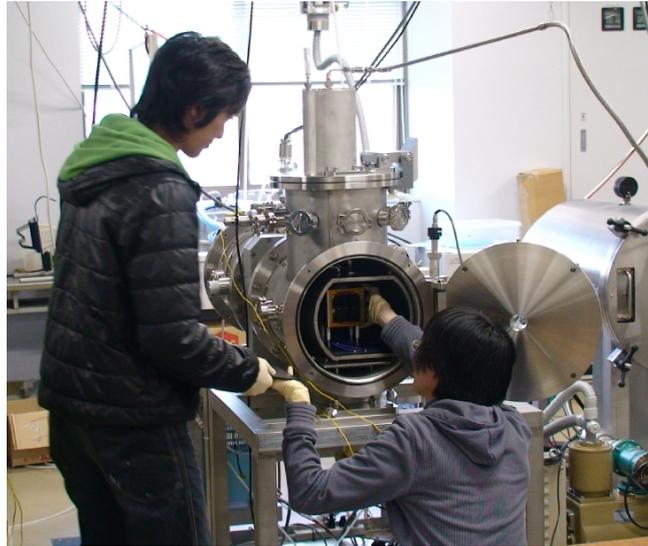


図 42 熱真空試験機

デバイスの温度サイクルのみを試験する必要がある場合は、熱サイクル試験を使用することができる。例としては、ソーラーパネル及びアンテナが挙げられ、これらの試験は、設計と製造プロセスを検証するために、開発段階で実施しなければならない。ISO-19683 の表 5 には、熱サイクル試験の試験レベルと条件が記載されている。温度範囲は -70°C から $+100^{\circ}\text{C}$ 、ISO-19683 では 24 サイクル以上とされているが、粗悪なソーラーパネルは数サイクル後に欠陥を示すことが多いため、10 サイクル後に供試体をチェックすることを勧める。図 43 は、九工大の熱サイクルチャンバーである。これは -190°C を出せるように改造された工業用オーブンだが、 -70°C が要求の場合については、市販の既存製品を用いることができる。



図 43 九工大の熱サイクルチャンバー

長距離試験では、衛星と地上局間の通信が回線設計に十分な余裕を持っていることを確認する。多くの通信機能は無響室内で外部からの妨害を避けて試験を行うが、最終的な確認には長距離通信試験が必要となる。この通信試験では、完全に組み立てられた衛星を地上局から離れた場所に移動させる。通常は RF 信号経路への障害物を避けやすい山の上の高い場所が選ばれる。衛星がそのような離れた場所に置かれたとしても、その距離は地上局と軌道上の衛星との間の実際の距離に比べて非常に小さいものである。そこで、地上局側または衛星側に RF 信号減衰器を追加設置する。接続が緩いと減衰量が大きく変わる可能性があるため、測定による減衰量の確認を強く勧める。

図 44 と図 45 は、アマチュア UHF 周波数をアップリンクとダウンリンクに使用した場合のキューブサットの典型的な長距離通信試験の模式図を示している。この図の場合では、地上局と衛星間の距離は約 6.3[km]であり、実際の距離よりもはるかに短い。地上局側に可変アッテネータを設置して距離の差を補正し、減衰量を増やして通信が成功する最大減衰量を求める。この長距離通信試験の利点は、ドップラーシフトを除けば、実際の飛行状況に非常に近い試験構成になっていることである。この試験において、地上での電波発射には周波数の予備免許が必要となる。

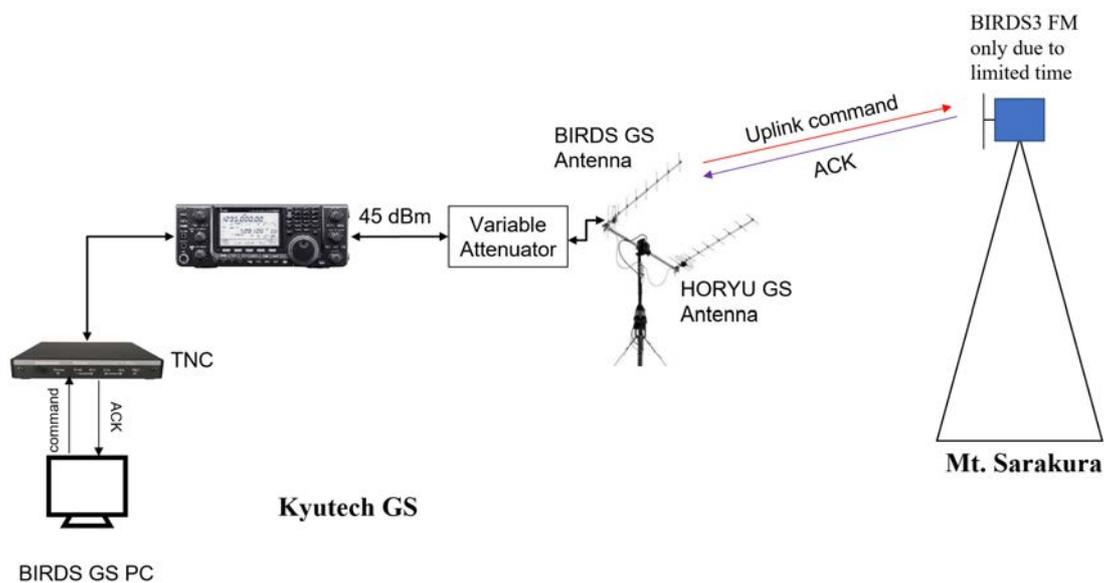


図 44 典型的な長距離試験構成の模式図

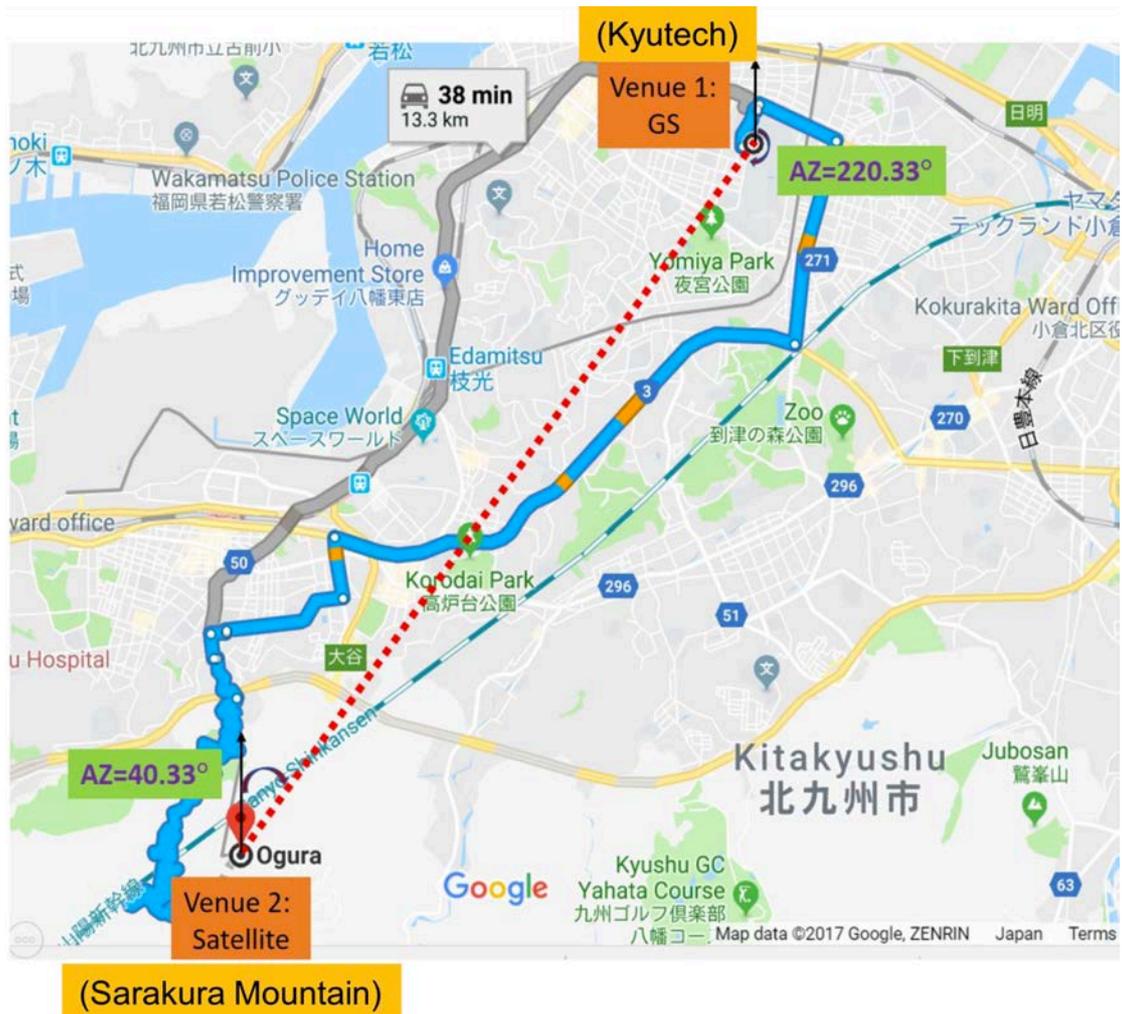


図 45 長距離試験場所の例

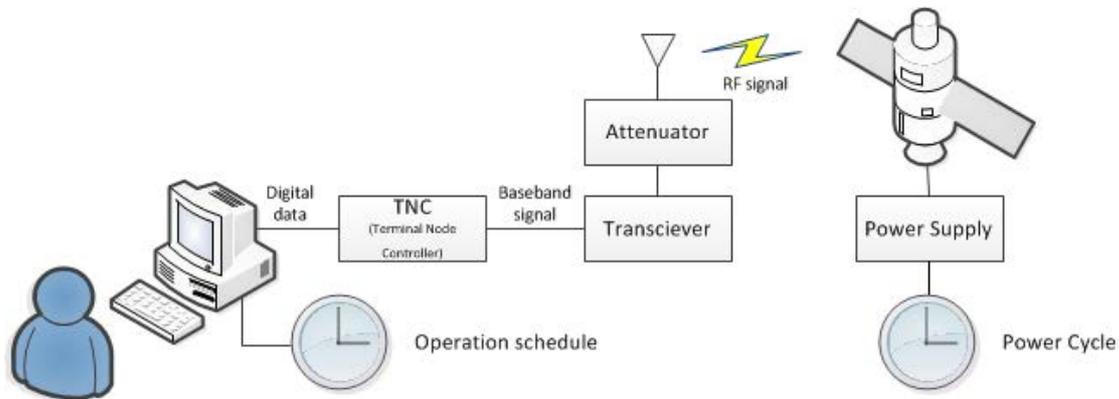


図 46 End-to-End 試験構成例

上の画像は、地上局に近い場所に衛星フライトモデルを設置した End-to-End 試験構成の代表的な例を示している。距離が大きくないため、RF 信号の電力を下げるためのアッテネータが必要であり、アンテナの回転制御は必要ない。しかし、実際の運用構成を同じにするためには他の運用系が必要である。

End-to-End 試験は、衛星システムの最終段階において、実際の運用に近い状態での確認を行うことを目的としている。衛星の電力は、オンオフ制御によるタイマー機能付き電源で制御される。オンオフ制御は軌道上での実際の発電を模擬したものであり、その出力電力と時間は軌道状況に応じて制御する必要がある。電力の状態は、電力収支バジェットに対する有効性を確認するために記録する必要がある。バッテリー電圧は非常に重要な情報を提供する。ただし、衛星にモニタ用の信号線を付けたままでは、衛星の状態を確認することはできない。外部からの導通ノイズを避けるために、衛星には外部ハーネスをつけないことが必要である。テレメトリデータで衛星状態を確認する必要がある。また、軌道条件を考慮した運用スケジュールに沿って運用を行う。LEO 条件の衛星であれば、通常 1 日 4 回の衛星運用が可能で、その運用時間も軌道条件と合わせて計算され、通常 5~15[分]である。高度 500[km]以上の太陽同期軌道 (SSO) を使用した場合の衛星運用の例を以下に示す。この End-to-End 試験では、衛星へのアクセスは制限されている。この試験では、すべてのコマンドを試験する必要があり、この試験で試験されなかったコマンドは、コマンドの安全性が保証されていないため、実際の運用では使用すべきではない。End-to-End 試験は、実際の運用に入る前のチームのための良いリハーサルと運用訓練の機会となる。

表 14 衛星運用スケジュール例、SSO の場合

Pass	AOS(JST)	LOS(JST)	Max. Elevation [deg]
1	17 Jan 2019 11:24:39	17 Jan 2019 11:32:46	8
2	17 Jan 2019 20:24:21	17 Jan 2019 20:33:41	12
3	17 Jan 2019 21:56:46	17 Jan 2019 22:07:55	32
4	18 Jan 2019 09:28:56	18 Jan 2019 09:39:38	24
5	18 Jan 2019 11:02:50	18 Jan 2019 11:12:35	15
6	18 Jan 2019 20:04:23	18 Jan 2019 20:11:44	6
7	18 Jan 2019 21:35:22	18 Jan 2019 21:46:51	65

12.安全

すべての衛星は、その大きさ、ミッション、価値、能力、その他の性質に関わらず、安全要求事項[12-1]に準拠しなければならない。この記述は、1U やそれ以下のキューブサットにも適用される。キューブサットは、低コストかつ短納期を実現するために、従来とは異なるリスクを伴う開発と管理のアプローチを利用する *lean satellite* の良い例である[12-2]。この *lean satellite* 開発理念は、ほとんどすべての大学のキューブサットプロジェクトや、非宇宙開発国のキューブサットプロジェクトで採用されているが、特に国の最初の衛星を作る場合には、リソースが非常に限られているため、この開発理念が採用されている。

システムの安全性は、ハザードを特定することから始まる。ハザードとは、「システムの内部または外部にある、危害を引き起こす可能性のある状態または条件」[12-3]である。各ハザードのリスクは、発生の可能性と結果の深刻度の積によって評価される。ハザードは、すべての衛星に共通するもの (*Standard hazards*) と、個々の衛星に固有のもの (*Unique hazards*) に分けられる。ハザードは、リスクを許容できるレベルまで低減することで制御する必要がある。ハザードを制御するために、安全要求が与えられている。つまり、衛星の設計の一部がハザード項目とみなされなければ、安全性の観点から何もする必要はない。ハザード項目とされた場合は、ハザードをどのように制御するかを示し、その制御がフライトモデルに適用されているかどうかを検証する必要がある。ハザードに該当するかどうかについて、衛星開発者と打上げ側の間で誤解が生じた場合、問題が解決するまで衛星の納入が遅れ、衛星プロジェクトの大幅な遅延を招くことになる。また、特定のロケットへの相乗り依存した *lean satellite* の場合、最悪の場合、衛星の代わりにダミーマスが打ち上げられる可能性さえある。日本では2016年以降、このようなケースが2件発生している。

人工衛星が POD に収まったとしても、各ロケット特有の安全要求を満たす必要がある。現在、キューブサットは、市場（インターネット）で購入した COTS コンポーネントを組み合わせられて作られることが多い。これらのコンポーネントは、ISS 放出のための安全要求を満たすとは限らない。ISS 放出の場合でも、どこの国に打上げを依頼するかによって、安全要求の解釈が異なる。COTS 部品の改造はリスクが高く、時間がかかる。部品メーカーは製品の改造を拒否することが多いが、改造に必要なコストと時間が非常に高額になることを考えれば理解できる。そのため、衛星開発者は自己責任で変更しなければならないことが多く、その変更が安全であることを打上げ側に納得してもらうために、追加の検証が必要となる。衛星開発者は、打上げの選択肢を決める前の段階であっても、衛星開発の初期段階から、設計を様々な安全要求に適合させる方法と、その適合性を検証する方法を検討する必要がある。

ISS の安全性に関する要求事項について、ロケット打上げと比較した場合の主な違いは以下の通りである。

1. ISS 放出の場合、キューブサットは輸送バッグの中に入れて打ち上げられるため、ほとんどのロケット打上げで要求される爆発性危険雰囲気中の発火防止の要求はない。も

し、その要求があったときには、機械式スイッチのチャタリングを防止することが必要であるときで、その場合チャタリングに対する 3 つのインヒビット (Three inhibits)が必要である。

2.電磁放射、すなわち無線放射は、展開後 30[分]からのみ許可されている。タイマー機能の点検が必要である。

3.材料の可燃性は、材料識別使用リスト(MIUL)で確認する必要がある。

4.材料のオフガスについては、MIUL により確認する必要がある。

5.衛星に太陽電池カバーガラス、レンズなどの飛散性のある材料が露出している場合は、振動試験を行った後、その健全性を確認しなければならない。

3～5 の項目は ISS の加圧モジュールの中に衛星を搬入するため、ISS 独自のものである。その他の重要な安全関連項目を表 15 に示す。

表 15. ISS 放出に向けた主な安全関連項目

安全項目	要求
構造検証	<u>構造要求 (主構造、レール強度、剛性) は構造解析のみで確認する。</u>
バッテリー	<ul style="list-style-type: none"> 各環境試験の前後に電池セルの特性評価を行う必要がある。
電源	<ul style="list-style-type: none"> バッテリーが UL 認証を取得していても、バッテリーの保護機能を試験する必要がある。
分離スイッチ	<ul style="list-style-type: none"> <u>爆発しやすい環境ではないため、チャタリングを確認する必要はない。</u> インヒビット機能の検証が必要である。
RF 放射	<ul style="list-style-type: none"> 地上での運用中は、危険度は多様である。 RF 放射強度は衛星から 1[m]で評価する。
POD での アンテナ展開	<ul style="list-style-type: none"> POD 内壁に接する面の厚さが 1[mm]以上であれば、危険性はない。 偶発的な展開で衛星が POD 内でひっかからないことがデモにより実証された場合は、1本の紐で固定してもよい。 デモンができない場合は、1個の展開に2つ以上の固定(2つの紐)が必要である。

ロケットの打ち上げと ISS への打ち上げには大きな違いがあり、土壇場での切り替えが非常に難しいことが多い。ISS への打ち上げでは、ランダム振動試験のみが必要となる。表 15 に示した項目の中で、衛星開発のスケジュールに大きく影響する可能性があるのは、電池とアンテナである。この2つの項目は市場から調達されていることが多く、安全性の要求を満たすための変更が困難である。

アンテナの展開には、多くのキューブサットはバーニング・ワイヤ機構を使用しており、

タイマー回路またはソフトウェア・タイマーで制御し、紐（釣り糸が最も一般的）をニクロム線で燃やす。ほとんどのキューブサットは展開可能な UHF/VHF アンテナを備えている。POD 内での偶発的な展開は、衛星が POD 内で立ち往生する状況を引き起こす可能性がある。再放出のために、POD はエアロックから再び ISS に入る。衛星が POD 内に留まったままだと、宇宙飛行士や ISS に安全上のリスクを与える可能性がある。そのため、衛星が POD の中には残らないことが要求される。また、アンテナを展開した状態で衛星を POD から放出すると、誤った方向に放出されて ISS に衝突する可能性も懸念される。

アンテナの展開機構は、衛星の運命を決定する重要なアイテムの一つであるため、キューブサットの開発者は、多くの場合、既知のメーカーから展開可能なアンテナを購入する。ほとんどの場合、それらのアンテナは 1 本の紐だけで保持されており、市販品を改造して第 2 の紐を持つようにすることは非常に困難だ。そのため、POD 内にアンテナを展開してもハザードにならないように設計することを勧める。一番簡単なのは、アンテナの厚さを 1[mm] 以上にするることである。2 つ目は、POD 内にアンテナを展開しても衛星が展開（放出）されるように設計することである。アクセス窓のカバーが+X 面にしかないので、アンテナを+Y 面か-X 面に限定するのも一つの案である。

電池の安全性に関する要求事項は、かなりの量の検証活動を課す。個々のセルは、真空曝露や振動に耐えられるかどうかを評価する必要がある。容量、過電圧、質量などのセル特性は、通常、1 サイクルの充放電を経て測定する必要がある。この測定は、真空や振動などの各環境試験の前後に行う必要がある。

キューブサットの開発者は、市場から電池を調達している。それらは単一セルか、電力系統に組み込まれていることが多い電池パックのどちらかである。単一セルを購入する場合は、開発者自身が個々のセルを試験して電池パックを設計することができるので、安全性の要求を満たすことは難しくない。しかし、電池パックを調達した場合、個々のセルを試験することは不可能である。衛星開発者は、電池業者に個々のセルの試験結果に関する情報を求める。電池業者は、顧客が購入した電池パックに使用されているセルについては、その情報を提供することができるが、その情報は、同じロットの他のセルについての情報である。したがって、打ち上げ側が、セルがどのようにスクリーニングされているかについての情報を求めても、通常は非常に入手が困難である。そして、非常に長いメールでのやりとりが始まる。だからといって、個々のセルを購入して、衛星開発者自身がスクリーニングを行う方が良いというわけではない。リチウムイオン電池は、個人がセルメーカーの公式認定ルートで調達するのは難しい。そのため、電池保護回路の情報が必要になることが多く、入手が困難である。また、その情報を提供してくれる電池業者を探すのも一苦労である。

図 47 に BIRDS-2 EPS の回路を示す。BIRDS-2 は、インヒビットとして 2 つの機械式分離スイッチ(Dep.SW)と 1 つの RBF 端子を採用している。これらは MOSFET スイッチ(Sep.SW)を制御する。バッテリーから負荷への電流は、Sep.SW2, Sep.SW3, Sep.SW4 によって遮断される。太陽電池から負荷への電流は、Sep.SW1, Sep.SW2, Sep.SW3, Sep.SW4 によ

て遮断される。Sep. SW1 と Sep. SW2 は同じ RBF 端子で制御されているため、両者は 1 つのインヒビットとみなされる。したがって、太陽電池から負荷への電流は 3 つのインヒビットのみにとなる。衛星の偶発的な電源がオンになることに加え、地上での作業時や打上げ時のバッテリーの過充電や過放電を防止する必要がある。図 47 には、これら 2 つに対するインヒビットについても示している。これらは、保護回路や電圧変換回路とスイッチを組み合わせで作られている。

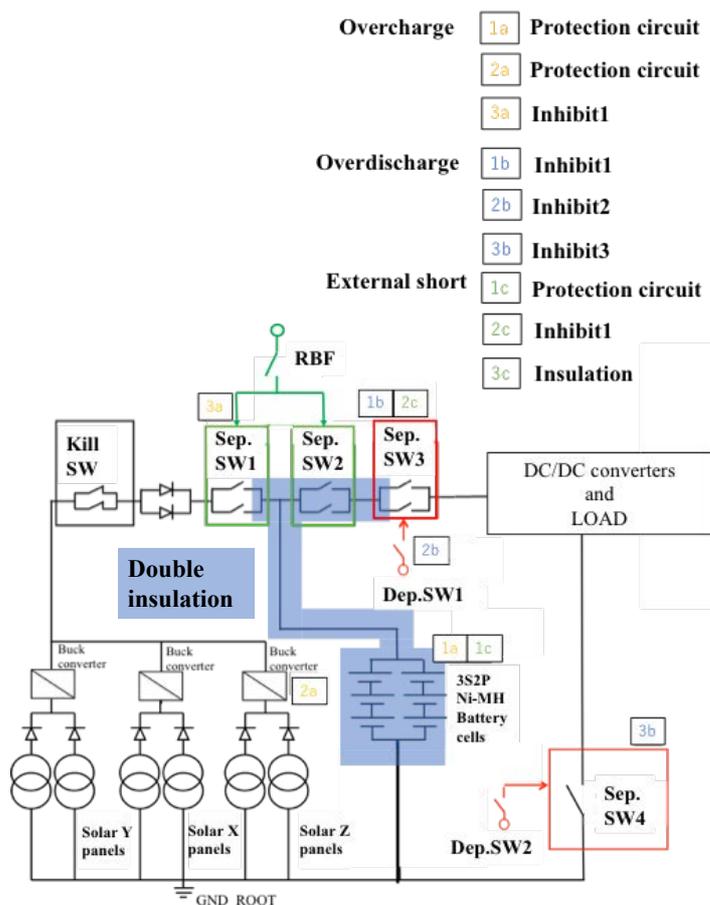


図 47. BIRDS-2 EPS 回路図

電池の外部短絡は致命的なハザードに分類され、3 つのインヒビットで防止する必要がある。適切な絶縁と 2 つの短絡防止装置（インヒビットスイッチで代用可能）が必要である。外部短絡では、短絡自体が 1 つの障害とみなされるため、2 つのインヒビットが必要となり、2 か所故障許容設計となる。

BIRDS-2 では、短絡保護装置として、バッテリー内部の PTC(Positive Temperature Coefficient)回路と Sep.SW2 を 2 つのインヒビットとしてカウントしていた。しかし、バッテリーとインヒビットの間で短絡が発生した場合、PTC のみが保護として機能する。そのため、もう一つ保護機構が必要となり、電池と Sep. SW3 の間に二重絶縁を追加した。二

重絶縁を Sep.SW3 まで延長したのは、Sep.SW2 で使用している MOSFET が短絡した場合を考慮する必要があったからである。Sep.SW2 がメカニカルスイッチである場合、Sep.SW2 までであれば二重絶縁が必要となる。図 48 に二重絶縁を追加した箇所を示す。

絶縁は、2 点間の距離が 1[mm]以上になると 1 つのインヒビットとカウントされる。絶縁を二重にするには、絶縁層をもう一層追加する必要がある。BIRDS-2 では、バッテリーに溶接されたハーネスを、コネクタを介してプリント基板に接続した。バッテリーとコネクタの間のケーブルジャケットはカプトンテープで覆い、プリント基板上では、HOT 線と GND 線は 1[mm]以上の距離で区切られている。また、それらの間に絶縁層を挟んで別々の層に敷き詰めた。プリント基板上の端子は 1[mm]以上離れている。図 48 に示すように、プリント基板の表面をカプトンテープで覆うことにより、二重絶縁を実現した。

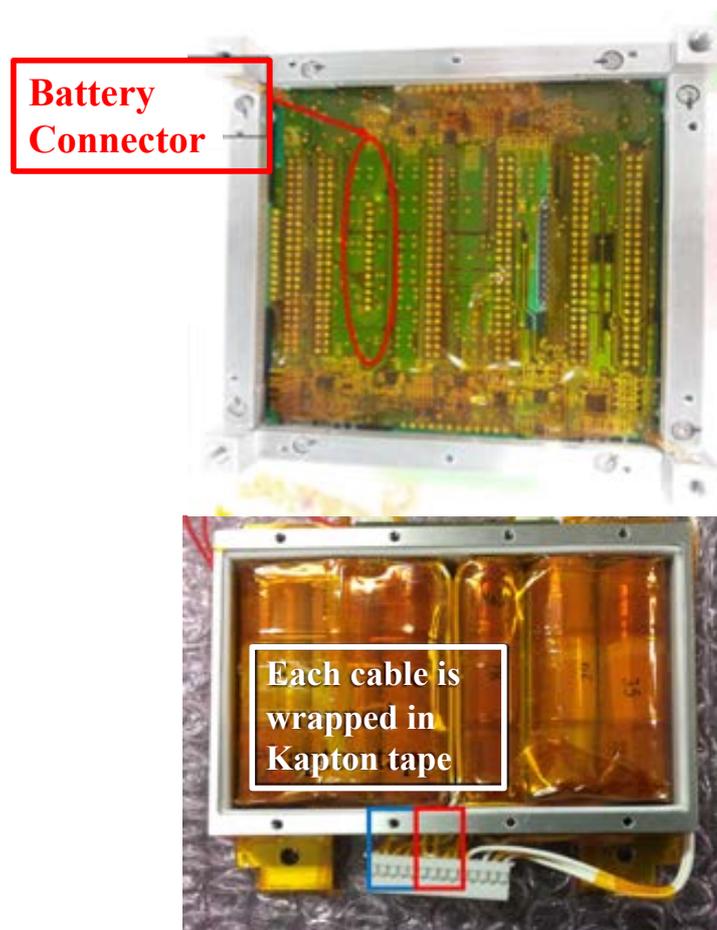


図 48. BIRDS-2 EPS の二重絶縁（上段：プリント基板、下段：バッテリーボックス）

外部短絡だけでなく、電池自体の内部短絡を防ぐ必要がある。基本的には、各環境試験

の前後で各電池セルの特性を測定し、大きな変化がないことを確認する必要がある。

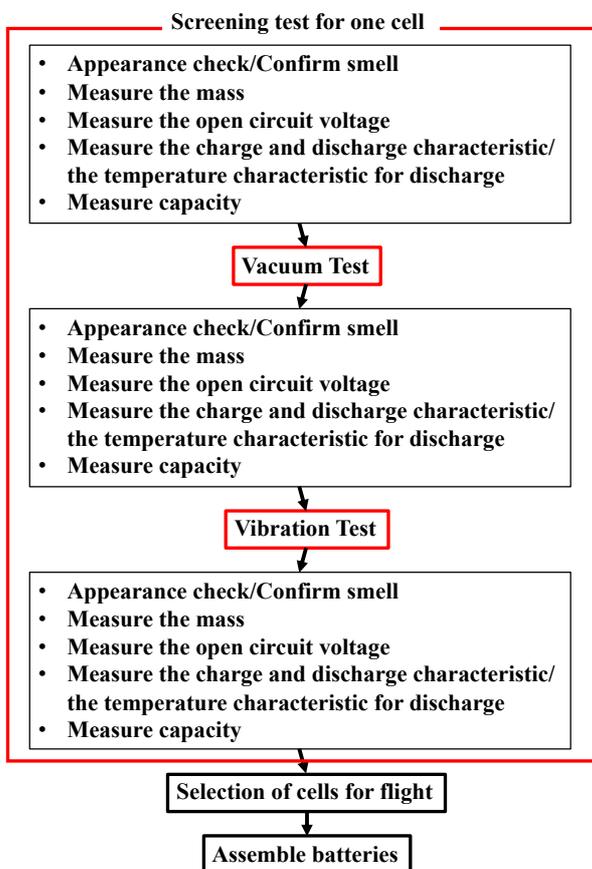


図 49. BIRDS-2 のバッテリー審査の流れ

BIRDS-2 は、ニッケル水素電池（エネルーブ、HR-3UPT）を使用した。個々のセルを検証するために、図 49 の流れに従った。最初の特性測定（開放電圧、電池容量、質量、目視検査、臭気）を行った後、電池を 1×10^{-3} [Pa] の真空中に 6 [h] 放置。その後、再び特性測定を行い、開回路電圧の変化（0.1%未満）、電池容量の変化（5%未満）、質量の変化（0.1%未満）が許容範囲内であることを確認した。そして、各軸に 6.1[Grms] のランダム振動を 1[min] かけた。特性（開回路電圧、容量、質量）の変化が許容範囲内にあるセルをフライトバッテリーとして選定し、電池パックに組み立てた。BIRDS-2 で使用した電池セルの保存温度は $0 \sim +40^{\circ}\text{C}$ とした。ISS の要求温度は -15°C から $+60^{\circ}\text{C}$ であった。電池がこの拡張された温度範囲でも問題ないことを示すために、選定された電池の同じロットからのセルを恒温槽で 90[分] の温度範囲に曝露した。温度試験の前後で充放電特性を測定し、変化がないことを確認した。

参考文献

[12-1] ISO-TS-20991, "Space systems -- Requirements for small spacecraft", July 2018.

[12-2] M. Cho and F. Graziani, ed., "Definition and Requirements of Small Satellites Seeking Low-Cost and Fast-Delivery", International Academy of Astronautics, February 2017.

[12-3] NASA System Safety Handbook, Volume 1, "System Safety Framework and Concepts for Implementation", NASA/SP-2010-580, November 2011.

13.異文化横断とキャパシティビルディングの側面

BIRDS のような国際的なキャパシティビルディングプロジェクトはさまざまな方法によって構成することができるが、BIRDS プロジェクトは特定の制約により特別なパターンに従ってプロジェクトが構成されている。これらの制約の概要については以下に示す。これらによって2年間のBIRDSの教育システムの構成を確立している。

最初の制約は、1つのプロジェクトの期間にBIRDSの複数のステークホルダーをまとめることは可能である。(例えば2015年～2017年のBIRDS-1プロジェクトには5つのステークホルダーが関与していた)。しかし経済的に実用的で実行可能なものにするためには単一のステークホルダーが1つの衛星のコストを負担する責任を負う必要がある。なぜならステークホルダーの間でコストを分担すると複雑になりすぎるためである。したがって単一のステークホルダーと九州工業大学は各当事者の義務を明記した契約(「共同研究契約」(CRA))に署名した。BIRDSのCRAにはステークホルダーが衛星のハードウェアのコストと打ち上げのコストを補うために九州工業大学に支払う必要がある金額の合計や、期間中に九州工業大学が提供するプロジェクトを最初から最後まで実行するために必要なアドバイス、コンサルタント、トレーニング、サービス、管理、教育サポート及び他の形式の情報について詳細に記載している。CRAはまたステークホルダーのすべての義務を明記する。例えばステークホルダーがしなければならない調整業務(ウィーンの国連宇宙部への衛星の登録等)である。



図 50 ガーナのANUCはCRRAに署名した最初のBIRDSのステークホルダーである
調印式は2016年1月6日に九州工業大学で行われた

経験上、大抵のステークホルダーはその国を代表する。例えばBIRDS-1プロジェクトではAll Nations Universityという私立大学がガーナを代表した。この大学はガーナで最初の地球周回衛星であるガーナのBIRDS-1衛星の実現のために九州工業大学とBIRDS-1のCRA

に署名した。(図 50 参照)。それに応じてステークホルダーは通常九州工業大学の施設で衛星を開発する学生を選ぶ。ステークホルダーは通常 2~3 人の学生で構成される衛星開発グループを作る。これらの学生はたいていその国の国民である。

考慮すべきもう 1 つの重要な制約は時間である。BIRDS プロジェクトの進め方は独特である。世界中のほとんどの大学では、開発の遅れは避けられないと想定しているため衛星プロジェクトの期限にあまり厳密ではない。しかし BIRDS は非常に厳しい。これが、筆者らが独特であるという理由である。次の 2 つの理由によってプロジェクトの遅延(スケジュールスリップ)は許されない。

1. 学生のほとんどは修士課程の学生である(その他は博士課程の学生である)。九州工業大学の修士課程は厳密には 24 か月である。BIRDS の学生はこの絶対的な制約の範囲内で学位要件と衛星プロジェクト(軌道上で周回している衛星を運用する時間を含む)を完了する必要がある。彼らが九州工業大学を卒業した時、衛星は宇宙で運用されていなければならない。これは重要な目標である。したがって BIRDS プロジェクトの場合、衛星は常に予定通りに設計、開発、試験、打ち上げ、運用が行われる。もし衛星が宇宙になければプロジェクトを終わらせることができない。さらにステークホルダーは必要な資金を衛星のために全額支払っており、それは契約上の合意であるため衛星を完成させて打ち上げる必要がある。
2. BIRDS の衛星は ISS に搭載される。九州工業大学は JAXA と協力し、JAXA のロケットや、SpaceX のロケットなどのサードパーティのロケットを使用し ISS への適切な打ち上げを手配する。ISS へと運ぶロケットのオプションは様々あり、使用されるロケットはその都度確立される。いずれにせよ JAXA とのこの「打ち上げのための合意」はもちろん署名された契約である。契約したロケットには複数の契約した顧客がいることが多く遅れた顧客を待つことはできないので、BIRDS プロジェクトのメンバーは契約後決められた日時通りに衛星を引き渡すことを要求される。予定されているロケットの打ち上げに間に合わなかった場合、次に利用可能なロケットはプロジェクトに適さくない。なぜなら次の打ち上げでは遅すぎるためである。結論として BIRDS の衛星を遅れて引き渡しすることはできない。これは BIRDS プロジェクトの特徴の 1 つである。参加する学生には多くのプレッシャーを与えるが、上記の要因のためこの状況は回避できない。

考慮すべきもう 1 つの主な制約は、BIRDS は主にアプリケーションプロジェクトや技術実証プロジェクトではなく、主としてキャパシティビルディングプロジェクトであることである。また BIRDS のメンバー(学生の指導教員を除く)は衛星開発の経験がないことである。彼らは純粋に初心者である。そのため衛星の設計や組み立てや試験中に多くの間違いを犯す。失敗から多くのことを学ぶのでこれは効果的な教育である。しかし難しいのはエラーが発生すると時間が失われることである。衛星は時間通りに引き渡す必要があるため、失わ

れた時間を取り戻す必要がある。これにより関与するすべてのメンバーに多大なストレスが生じる。プロジェクト内の他の場所で発生した失敗によって自身の作業が遅れることがある。これにより冷静でいられなくなりチーム内で摩擦が発生する可能性がある。



図 51 BIRDS チーム料理コンテスト

チームのパフォーマンスと調和性を向上させるため、多くの交流イベントがある。図 51 は 2016 年 5 月に開催された BIRDS-1 料理コンテストを示している。競合するチームはガーナ、ナイジェリア、モンゴル、日本、バングラデシュの出身者である。勝者はバングラデシュのチームであった。

もう一つの大きな制約は言葉の壁である。BIRDS の開発環境ではだれも母国語を使用していないことに留意すべきである。九州工業大学は日本語を使うスタッフと学生がいる日本の大学である。筆者らは日本にいる。ほとんどのハードウェア販売業者も日本の企業で日本語を話す。しかしほとんどの BIRDS の学生は海外出身であり日本語を話せない。よって日常のコミュニケーションは簡単な解決策のない難しい「異文化」の状況になる。多くの日本人学生が留学生のために自発的に通訳となる。翻訳作業に自発的に取り組む日本人学生は英語力に自信を持つようになるだろう。それはおそらく彼らにとって長期的に大きなプラスとなる。留学生の中には日本語を学ぶ努力をしている学生もいる。しかし 2 年という期間では日本語を十分に習得できない。

BIRDS の主な異文化的な成果は情報の伝播である。海外の報道機関は自国が最初の衛星を開発していることを発見すると、Skype や電話などを介して自国の学生へ多くのインタビューをおこなう。ゆえに情報が収集され母国に流通する。

BIRDS の教育プログラムには課題と制約がある。制約は(1)予算、(2)時間、(3)学生のスキル、(4)対人コミュニケーションスキル(言語の壁)によるものである。九州工業大学の教員にとっての課題は学生がこれらの大きなハードルを克服できるように支援することである。これを効率的に教えることは非常に重要なことである。なぜならそれが成功しないと BIRDS の卒業生が母国に戻れなくなり BIRDS プロジェクトの過程を繰り返し母国で 2 番目の衛星を製作することができなくなるためである。結局のところ本当に意味のあるテストは九州工業大学で監督のもと最初の衛星を製作することではなく、九州工業大学の監督無しで母国に 2 番目の衛星を製作することである。BIRDS の卒業生が国内のアイデアとリソースを使用して母国で衛星の設計、製作、試験を続けられれば BIRDS は「持続可能な事業」であると主張できる。九州工業大学にとってこの持続可能性は非常に重要な戦略目標である。それを達成するには多くの想像力が必要である。

BIRDS は衛星のコンステレーションでありこれは興味深い事実である。つまり各衛星は同じ設計でなければならない。よってたとえ国 A、国 B、国 C が主要なステークホルダーとして関与しても衛星は同じものになる。したがって開発の最初のステップはすべての参加者(ステークホルダーとその学生)が一連の会議に参加して衛星システムをどうすべきかを確立することである。これは簡単な過程ではない。皆がそれぞれの考えを持っている。各当事者はプロジェクトに現金を投資する。各当事者には発言権がある。しかしコンステレーションがステークホルダーのためにどう働くかを定める過程は関係者全員にとって非常に重要な教育的な経験である。関係者はその過程で、上記で述べた制約、つまり総予算、総開発時間、および学生のスキルレベルについて考える。もしミッションが簡単すぎるなら外部の傍観者はあざ笑い、ステークホルダーは反対する。もしミッションが難しすぎるとハードウェアとソフトウェアでミッションを実装する必要があるため、学生が後で苦しむこととなる。バランスをとる必要がある。

BIRDS 国際ワークショップ

BIRDS を「持続可能な教育プログラム」にすることは挑戦的な提案である。大学コンソーシアムの世界ではプロジェクトが行き来している。プロジェクトが終了するまでは、チームの結束があるが、通常はその後分散する。これはリソースと機会の損失である。BIRDS プロジェクトは初期の段階でイベントを開催し BIRDS のすべてのステークホルダーを集めブレインストーミングを行った。その結果、問題、解決策、将来の計画及びコラボレーションの新しい分野について話し合う必要があることに気づいた。それに基づいて、以下のワークショップ(BIRDS のステークホルダーを含む)が毎年開催されている。

2017-2 回目の BIRDS 国際ワークショップ ANUC ガーナ

2018-3 回目の BIRDS 国際ワークショップ NUM モンゴル

2019-4 回目の BIRDS 国際ワークショップ BRAC バングラデシュ



図 52 2018 年にモンゴルで開催された第 3 回 BIRDS 国際ワークショップの集合写真
3 日間の会議と交流のために様々な BIRDS 関係者が集まった

前述のワークショップは以下の BIRDS Project Newsletter で文章化されている。

1 回目の BIRDS 国際ワークショップ (Kyutech 日本)

BIRDS Project Newsletter 第 6 刊 ページ 4-18

2 回目の BIRDS 国際ワークショップ (ANUC ガーナ)

BIRDS Project Newsletter 第 23 刊 ページ 58-99

3 回目の BIRDS 国際ワークショップ (NUM モンゴル)

BIRDS Project Newsletter 第 31 刊 ページ 104-149

すべての発行物はこの Web サイトからアクセスできる。

<http://birds1.birds-project.com/newsletter.html>

このニュースレターの主な機能はすべてのステークホルダーに BIRDS プロジェクトに関する情報を提供し続けることである。月に 1 回 PowerPoint を pdf で発行し上記のウェブサイトアーカイブが残されている。BIRDS-1、BIRDS-2、BIRDS-3、BIRDS-4 の活動により

毎月多くのことが起こる。これらはすべて要約されニュースレターに掲載されている。この文章はすべてのプロジェクトの成果、イベント、偉業の永続的な記録としても提供されている。この情報は将来の BIRDS のステークホルダー（BIRDS-5 など）を惹きつけることにも役立つ。

さらにこのニュースレターはより広く聴衆に情報を伝えるのにも役立つ。世界中の学術機関、報道機関、民間企業、政府機関、NGO、国連機関が BIRDS の発展に関心を持っている。BIRDS を持続可能な教育プログラムにする方法は卒業生が九州工業大学を去った後もキューブサットに取り組み続けることである。これはこれらの国々が国の宇宙プログラムを確立するのを助ける必要があることを意味している。たとえば国は(1)宇宙機関を設立すること、(2)国立大学内に新しい宇宙研究所を設立すること、(3)宇宙活動用の NPO を作成することができる。

興味深い発展の 1 つは参加国内で BIRDS のようなプログラムが芽生えたことである。フィリピンには「BIRDS-2S」というプログラムがある。様々なフィリピンの大学が UPD 主導のこのプログラムに参加し九州工業大学の BIRDS プログラムと同様な方法で独自のキューブサットを作成している。同様のプログラムがマレーシア国内ではじまっており UiTM によって主導されている。

BIRDS パラダイムの主な貢献は途上国(アジア、アフリカ、中南米)に対して宇宙工学の修士課程プログラムの一環としてキューブサットの設計、開発、運用が可能であることを示したことである。どのように衛星を構築するか学びたい場合自分の手で構築することが重要である。本を読むだけでは衛星を作ることはできない。

14.持続可能な教育プログラムとしての実施

本書で解説されている BIRDS プロジェクトには、莫大な資金、人的資源、インフラ資源が必要である。BIRDS の各ステークホルダー (衛星を所有する人々)の資金援助がこのプログラムを支えている。また 5 人の教員と研究スタッフがプロジェクトに関与しており 100% 時間を費やしている人はいないが、かなりの時間を費やしている。九州工業大学の最先端のキューブサット研究、開発、試験設備、特に超小型衛星試験センターは各世代のプロジェクトが 2 年で終了するのに大きく貢献している。現在の問題はどのように持続させるかである。

筆者らは教員のリソースや多額の予算無しに BIRDS プロジェクトのような教育衛星プロジェクトを他の大学が実行可能で持続可能なものを目指すことを目指している。衛星プロジェクトが 1 回限りのプロジェクトである場合、広報の観点から得られる利益を考えると、大学の管理者がプロジェクトを支援する可能性が高い。そのため、多くの大学で比較的簡単にプロジェクトを行うことができる。教員も 1 回限りなら喜んで手助けをするだろう。しかし、衛星プロジェクトを通常の教育プロジェクトとして実施する場合は、資金を提供し教員の関与を減らす方法を見つける必要がある。

しかし衛星プロジェクトを教育カリキュラムの一部として提供するのに、次の 2 つのポイントが必要である。1. プロジェクトを計画通りに終わらせる。衛星プロジェクトの計画の中で最も未知数であるのは打ち上げであること。それゆえに ISS の放出用スロットを有料で確保することが最善の方法である。2. 学生を評価する必要がある。それゆえに最低限のレベルであっても教員の参加が不可欠である。同時に教員の負担を軽減する必要がある。

資金調達に関しては 2 つのことを並行して行う必要がある。プロジェクトにかかる費用を削減し外部資金を見つけることである。まず初めに教育用衛星であるため衛星は 1U キューブサットであることが必要で最も安価な打ち上げ方法を目指す必要がある。ただし無料の打ち上げは打ち上げ側の理由で遅延する可能性があるため推奨しない。現在キューブサットを打ち上げるのにもっと安価な方法は、ISS からの放出である。標準の衛星バスを使用すると時間だけでなくコストも節約できる。なぜならプロジェクト内でのバスの開発に費用と時間を費やす必要がないためである。外部資金を見つけることは難しいかもしれないが、軌道上で実験を行う機会は大学の外部の一部の関係者、つまり衛星を作ることに興味はないがデータを望んでいる人々にとっておそらく魅力的であるだろう。大学が企業パートナーからスポンサーを求めるシステムを設定している場合、企業パートナーからの一定の収入がプロジェクトの一部を財政的に支えるかもしれない。

教員の関与を減らすために、学生の世代間で体系的に知識を伝達することが役に立つことがある。BIRDS-3 プロジェクトと BIRDS-4 プロジェクトでは前世代のメンバーである BIRDS-1 と BIRDS-2 のティーチングアシストを採用した。彼らは衛星製作初心者である学生にとって大きな助けとなった。日本の典型的な工科系の大学では学生は研究室に入るまでに 3 年間過ごしたのち、卒業研究で 1 年、修士課程で 2 年の計 3 年間で研究室で過ごす。

1世代の衛星プロジェクトが2年で終了する場合プロジェクトに取り組んだ学生は3年目にTAとして働くことができる。そのために毎年1つの衛星プロジェクトを開始する必要がある。

1つの衛星プロジェクトの総コスト(ハードウェア、打ち上げ、運用)を800万~1000万円未満に抑えることができる場合50%は外部資金によって賄われ教員の関与はフルタイムの1/2~1に相当しプロジェクトは持続可能なものになる。

15. 結論

超小型衛星、特に教育的なキャパシティブUILDINGプロジェクトのためのキューブサットの需要が高まっている。本書では、第4章で標準のキューブサットのバスシステムの電気設計を紹介した。標準バスは BIRDS プロジェクトを支えるために開発された。シンプルな設計と統一されたデバイス選択により迅速なトレーニングと簡単な開発が可能な非常にシンプルなバスシステムである。その電源システムは、以前の BIRDS 世代で遭遇した問題を解決するように改善され、より効率が上がった。データ処理システムはキューブサット開発の経験がない初心者をサポートするように設計されている。

BIRDS バスの有効性は実際の BIRDS-3 キューブサットの開発作業で検証されている。3つの BIRDS-3 キューブサットが 2019 年 4 月に ISS に打ち上げられた。この標準の BIRDS バスを使用すると BIRDS-3 の開発時間は以前の BIRDS-1 及び BIRDS-2 世代よりもはるかに短くなりスケジュール管理が簡素化された。標準化されたバスはプロジェクトの時間節約に加えシンプルで迅速なトレーニングと BIRDS-3 のミッションシステムやその他の技術的な問題のためにリソースを回せるようになったことでより信頼度が高くなった。BIRDS-3 は 2019 年 6 月に ISS から放出された。その後 1 年近くに亘り、3 基の衛星全てが不具合を起こすことなく、ミッションを確実に遂行している。BIRDS-4 は 2018 年 10 月に開始され、その設計に全く同じ BIRDS バスを再利用した。BIRDS バスはキューブサットにとって一般的な標準ではなく教育用キューブサットのバスとして、1 年間のプロジェクトで早く衛星を引き渡すという非常に具体的な目的がある。しかし設計を変更せずに 3U までの拡張性があり、様々な打ち上げサービスと互換性があるため他の多くの教育用キューブサットプロジェクトもサポートできる。

本書はキューブサットプロジェクトの初心者役に役立つ他の基本的なキューブサットシステムの情報を記載しており、衛星開発だけでなくキューブサットのシステム全体をカバーするように試みた。実際キューブサットの開発は、キューブサットを組み立てることを意味するものではない。プロジェクトには衛星を運用するための地上セグメントとミッションデータから貴重な情報を抽出するためのデータ分析セグメントが必要である。キューブサットのプロジェクトには衛星運用、周波数免許の取得など他の重要な側面が含まれている。

通常教育カリキュラムの一環として衛星プログラムを持続可能なものにするには、確かに困難である。しかしプログラムを適切に設計すれば、そのようなプログラムを普通の大学で実行することは可能である。

謝辞

本教科書は、文部科学省の平成 31 年度地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、国立大学法人九州工業大学が実施した「国際協働衛星プロジェクトの実践を通じた、世界に通用する宇宙人材の育成」の一環として作成されたものです。