

超小型衛星に適した放射線試験に関する基礎実験

九州工業大学大学院 先機能システム工学専攻 博士前期課程 2年 趙研究室 学籍番号 12350911 奥村裕太

1.背景

近年、大学やベンチャー企業が超小型衛星の盛んに開発している。これは、超小型衛星が低コスト・短納期によるものである。超小型衛星とは、重量・サイズが概ね 50[kg]、50×50×50[cm]以内の衛星を指している。この超小型衛星のメリットである短納期・低コストは、民生部品(COTS: Commercial Off-the-Shelf)の利用により成り立っている。しかし、民生部品は、宇宙環境への信頼性が不明である。そこで、民生部品に対して、宇宙環境試験を行う必要がある。実際にそれらを衛星に使用した場合、放射線試験、熱真空試験、振動・衝撃試験など多くのことを行う必要がある。

九州工業大学でも、2010年4月~2012年3月までの約2年間で超小型衛星鳳龍式号を開発した。開発は、約15人体制で、2年間行っている。その内、合計環境試験時間は350日となり、一人当たりでは23日間は試験を行うことになる。この中には、放射線試験の時間が含まれていない。このように、衛星環境試験は、多大時間とコストがかかっている。これにより、超小型衛星のメリットが失われる可能性がある。

しかし、環境試験を省略した場合、衛星が停止する可能性もある。鳳龍式号では放射線試験を行わなかった。そのため、民生部品であるH8の放射線耐性が低く、また、その普及システムも効果がないことを認知せず、開発を行った。そして、H8の異常より軌道上でミッション実行不可能な状態に陥った。

そこで、衛星試験の時間とコストの抑制が必要とされている。よって、本研究では、超小型衛星に適した形で環境試験を標準化する。これによって、超小型衛星の開発時間とコストを抑えようと考えている。

2.研究目的

本研究では、環境試験の中で、放射線試験について研究を行っている。放射線試験は、他の環境試験と違い、放射線を用いるため、実験施設に限られる。また、放射線がどの素子に影響を与えるか選定し、試験することが必要とされ、電子素子の知識も必要になる。

本研究の最終的な目的は、超小型衛星の放射線試験の標準化である。そこで、私の目的は、標準化の基礎として「**実際の衛星システムや電子パーツの放射線試験を行い、試験標準化に必要な知見とデータを得る**」ことである。

そのため、コストと試験時間を短縮できらる放射線同位体であるカリホルニウム 252 を用いて放射線試験を行う。これは、従来の放射線試験のように加速器を利用しなくとも容易に放射線試験を行える。研究では、従来の加速器による放射線試験も行いカリホルニウム 252 の現象と試験時間の比較を行う。

3.放射線による影響

衛星上の放射線影響を表 3.1 に示す。

表 3.1 放射線による影響

	現象名	発生条件	影響
放射線による影響	トータルイオナイズド・ドーズ	累積的	太陽電池の劣化
			出力電圧の変化
			動作閾値の変化
			リーク電流の増加
	シングルイベントエフェクト	確率的	過電流の発生
			素子の故障
出力電圧の変動			
			メモリの反転

超小型衛星は、主に低軌道に投入され、寿命も大型衛星と比べ短い。そのため、超小型衛星に影響を与える可能性が高いのは、シングルイベントエフェクト(SEE)である。SEEは、メモリの反転を引き起こすなど影響が複数にわたる。特に超小型衛星においては、過電流を引き起こすシングルイベントラッチア

ップ(SEL)の発生の影響は大きい。

4.試験装置

A.シングルイベント用チャンバー

本試験では、京都大学原子炉実験場にあるシングルイベント用チャンバーを用いた。これは、放射性同位体であるカリホルニウム 252 を用いて放射線試験を行う。この試験装置は、図 4.1 のようにチャンバーとステージ、線源のみから構成されている。そのため、自身で試験対象システムと計測系を事前に九州工業大学内で製作し、それを用い試験を行う。

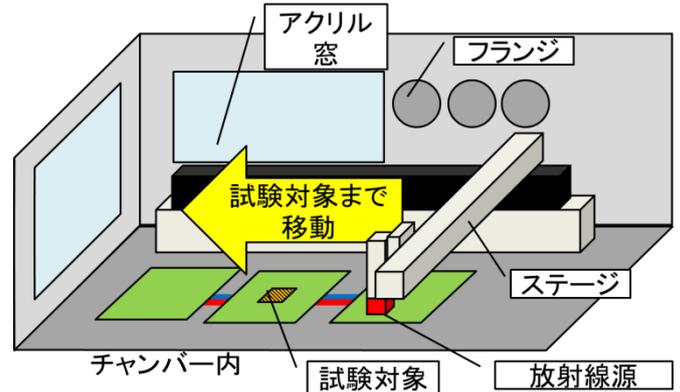


図 4.1 シングルイベント用チャンバー

B.軽イオン照射用チャンバー

カリホルニウム 252 と比較のため、高崎量子応用研究所の加速器を利用してプロトン試験を行った。利用した照射室は、照射中入室禁止のため、監視室にて試験対象と計測システムを遠隔操作する必要があるため、新たに試験システムを作成した。

5.試験内容

以下に示す試験データは、National Instruments 社製の Labview にて、計測プログラムを作成し取得している。

A.鳳龍式号の故障解析

鳳龍式号は、2012年5月18日に打ち上げられた。しかし、同年6月5日より地上からのコマンドを受け取らない異常状態に陥った。そのため、故障解析を行った。その結果、この原因は、「放射線」「熱サイクル」「内部帯電」「部品の欠落」と4つであると推測できた。本研究では、放射線による故障であるかを確認するため試験を行った。試験は、シングルイベント用チャンバーを用い、鳳龍式号と同じ基板を利用して、試験を行った。その試験システム図を図 5.1 に示す。

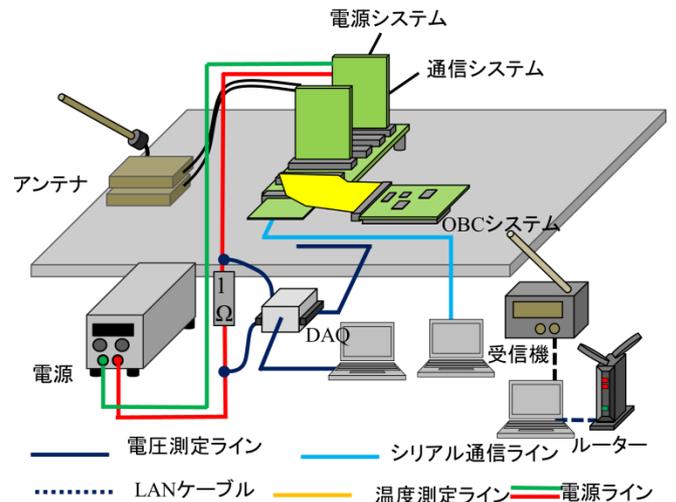


図 5.1 カリホルニウム 252 試験システム

この試験により、鳳龍式号のオンボードコンピュータ(OBC)に軌道上と同じ状況を模擬できた。これにより、鳳龍式号に発生した異常は、OBCのH8にSELが発生したため、動作が停止

し、引き起こされたことが分かった。

B. 鳳龍参号の耐放射線システムへの試験

2013年4月より新たに鳳龍参号を開発している。鳳龍参号では、鳳龍式号の異常現象より、新たな放射線耐性システムが必要とされた。そこで、OBCには電源リセット回路を設け、さらにSELに対応するためブレーカーの閾値を以前の0.5[A]から0.2[A]に設定直した。そして、それらの動作確認をするため、鳳龍参号OBC-ブレッドボードモデル(BBM)を作成し、システムがSELに有効であるかの動作試験を行った。

その結果、リセットシステムは、有効だが、ブレーカーは有効ではないことが判明した。このため、鳳龍参号のブレーカーは、製作コストが安いBBM段階で動作試験することにより、エンジニアリングモデル(EM)発注前に再設計する必要があることが分かった。このブレーカーがSELに無効化だった理由は、電流遮断時間が短かったのが原因と推測される。そのため、設計を変更し遮断時間を増加させた。

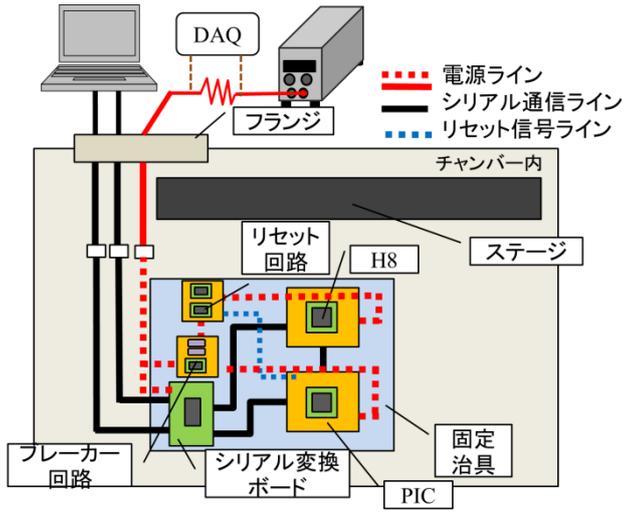


図 5.2 カリホルニウム 252 による評価試験システム

C. カリホルニウム 252 とプロトン試験の比較

カリホルニウム 252 は、重イオンを放射する。しかし、超小型衛星は主に低軌道に投入される。この軌道は、プロトンが支配的である。このため、OBCのH8を用いカリホルニウム 252 とプロトンで試験を行い、試験結果を比較した。構築したプロトン試験システムを図 5.3 に示す。カリホルニウム 252 試験は、図 5.1 とほぼ同じシステムを用い試験を行っている。

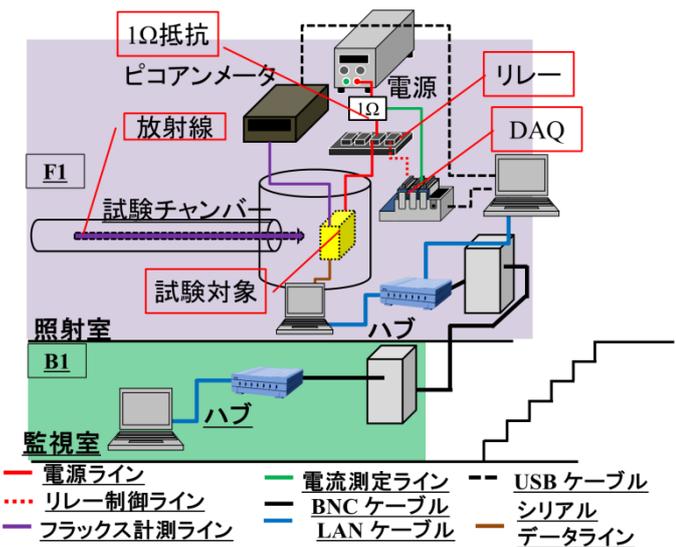


図 5.3 プロトン試験システム

それぞれの試験結果を表 5.1 に示す。比較の結果、同じように SEL が発生し、その時の消費電流も同程度になった。しかし、粒子 1 つあたりの SEL の発生確率であるデバイス面は、 10^{-6} 程度の差になった。カリホルニウム 252 の試験に発生時間

のばらつきが確認された。これは、今後、試験を行い、ばらつきを計測する必要がある。これにより、デバイス面を求める際の試験回数の目安を見積もることができると考えられる。

表 5.1 比較結果

線源	フラックス [/ cm^2/s]	SEL時の消費電[A]	平均発生時間[s]	デバイス面 [cm^2]
カリホルニウム	1	0.19	9.56	1.10×10^{-3}
	1.5	0.19	15.1	1.56×10^{-3}
	1.75	0.19	52.52	0.61×10^{-3}
	2	0.19	145.38	0.28×10^{-3}
プロトン	4.98×10^7	0.18	18.07	1.11×10^{-9}
	1.11×10^7	0.18	93.9	9.56×10^{-10}

カリホルニウム 252 における準備・試験・片付け時間は、18 時間であり、プロトン試験は 52 時間である。カリホルニウム 252 と比較して、プロトンの方が約 3 倍近くも必要時間が多いことがわかる。これは、プロトンには試験前に放射化計算と脱ガスのためのベーキング、真空引きに大きな差があるからである。プロトン試験は、本研究で 2 回行っているが、1 回目は、試験対象からの脱ガスが多く試験に必要な真空度に達することができず試験ができなかった。そのため、2 回目は、システムを単純化、ベーキングし、無事試験を行った。

6. 総括

本研究を通じて、カリホルニウム 252 を用いて、「故障解析」、「新システムの実証」を行うことに成功した。しかし、比較実験の結果より、プロトンと発生確率の差が確認された。しかし、これは、本試験で利用した H8 を基準とすることで他のマイコンのカリホルニウム 252 の試験結果をプロトンの試験結果に変換することで解決することができる。超小型衛星の開発では、システムの放射線耐性評価、従来素子の比較を行う場合、試験時間の短いカリホルニウム 252 を利用するのが望ましい。

これらのことを考慮し、図 6.1 に放射線試験選択フローをまとめる。

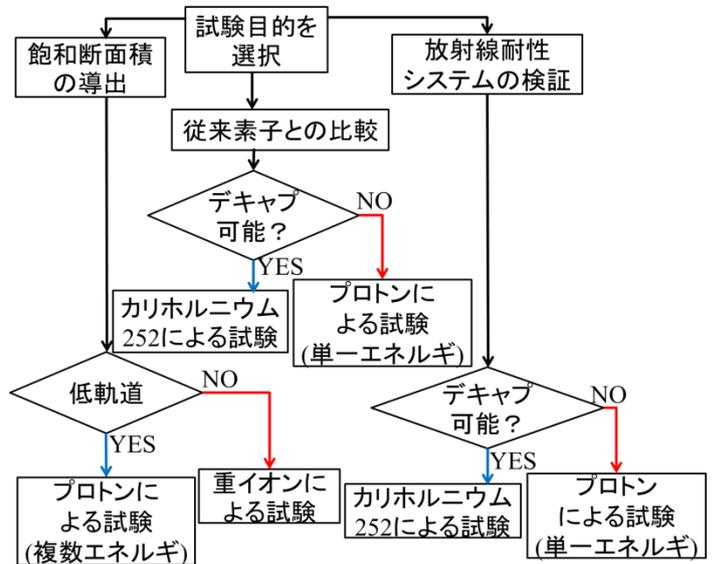


図 6.1 放射線試験選択フロー

学会発表実績(6 件)

- 国際会議 4 件
 - 4th Nano satellite symposium (2012)
 - 5th Nano satellite symposium (2013)
 - The 64th International Astronautical Congress (2013)
 - Tsinghua University IAF-SUAC International Student work shop (2012)
- 国内学会(2 件)
 - 日本航空宇宙学会西部支部(2012)
 - 57th 宇宙科学技術連合講演 (2013)