

民生電子部品の宇宙環境における耐放射線性の研究

Research of the radiation tolerance in space environment of COTS devices

前田 高広¹⁾ 富田 一正¹⁾ 掛橋 廉晴¹⁾ 明石 健二¹⁾

大島 武²⁾ 小野田 忍²⁾ 牧野 高紘²⁾

Takahiro MAEDA, Kazumasa TOMITA, Yasuharu KAKEHASHI, Kenji AKASHI

Takeshi OHSHIMA, Shinobu ONODA, Takahiro MAKINO

¹⁾ 株式会社エイ・イー・エス ²⁾ 量子科学技術研究開発機構

(概要)

平成 27 年度は試料としてイメージセンサ、メモリ、DA コンバータ及び PLL シンセサイザを選定し、重粒子線照射試験(以下、試験とする)を実施し、シングルイベント(SEE: Single Event Effect)耐性の確認を行った。選定した試料はいずれも、小型人工衛星及びその関連機器の開発に向け、宇宙環境で使用することを目的として選定した民生電子部品である。試験を実施した各試料について測定項目、試験結果を報告する。

キーワード: 民生電子部品、小型人工衛星、重粒子、シングルイベント

1. 目的

近年、小型人工衛星の開発が盛んになり、衛星搭載機器の低コスト化、小型化及び高機能化が要求されている。これらの要求を満たすため、民生電子部品の使用が望まれている。しかしながら、一般的に民生電子部品は宇宙環境下での使用を考慮して設計されておらず、耐放射線性は不明である。そこで民生電子部品の宇宙環境における動作状況、劣化状況を放射線試験により確認し、宇宙への適合性を把握する。

放射線の電子部品への影響は、大きくトータルドーズ(TID: Total Ionization Dose)とシングルイベント効果(SEE: Single Event Effect)に分けられる。TID は β 線、 γ 線、陽子線により発生する電子部品の性能劣化である。また、SEEは重粒子の入射により引き起こされる機能障害である。

本研究において、民生電子部品の使用を想定している小型人工衛星は運用期間が1年と短いため、TIDによる影響は少ないと考える。一方、SEEは1度の発生で電子部品そのものや周辺回路を破壊する可能性がある。そこで本研究は、様々な民生電子部品の試験を行い、宇宙環境における耐放射線性の評価を行うことを目的としている。

2. 方法

試験は、AVF サイクロトロン No.12 散乱ビーム照射試験装置 第4重イオン室にてカクテルビーム(N、Ne、Ar、Krの4線種)を使用し、実施した。SEE発生頻度は、試験により得られた反転断面積、LET(Linear Energy Transfer)閾値とCREME96(Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics (1996 Revision))を用いて計算した軌道上放射線分布より算出した。発生頻度の算出はSEEの発生状況により以下の手法のどちらかを適用した。

①ワイブル関数によるフィッティングを行う解析: ワイブル関数によりLETと反転断面積の関係を求め、軌道上の放射線分布から発生頻度を算出する。

②ワースト解析: SEEの発生した線種の次にLETの大きい線種で1回SEEが発生したと仮定し反転断面積を求め、軌道上の放射線分布から発生頻度を算出する。全線種でSEEが発生しなかった場合は最もLETの大きいKrで1回SEEが発生したと仮定する。

本研究で民生電子部品の使用を想定している小型人工衛星の軌道条件は、高度700km、軌道傾斜角98度、衛星構体は2mm厚アルミニウム、運用期間1年である。算出したSEE発生頻度と想定運用期間を比較し、民生電子部品の耐放射線性を評価した。

表1に本年度試験を実施した試料を示す。

表 1 試料一覧 (平成 27 年度)

| No. | 試料 | 主要仕様 | 照射線種 | 評価項目 | 試料数 |
|-----|----------------------|---------------------------------------|----------------|--------------------------------------|-----|
| 1 | イメージセンサ (カバーガラス有) | センサ種類:CMOS No. 1、2 は同じセンサ | N、Ne、 Ar、Kr | SEL (Single Event Latch-up)、 画像異常 | 1 |
| 2 | イメージセンサ (カバーガラス無) | センサ種類:CMOS No. 1、2 は同じセンサ | N、Ne、 Ar、Kr | SEL、画像異常 | 1 |
| 3 | メモリ | メモリ種類:SRAM 電源電圧:3.3[V] 容量:1[MB] | N、Ne、 Ar※ | SEL、SEU(Single Event Upset)、 異常動作 | 2 |
| 4 | DA コンバータ | 電源電圧:3.3[V] or 5.0[V] 分解能:14bit | N、Ne、 Ar、Kr | SEL、SEU、出力異常 | 2 |
| 5 | PLL シンセサイザ | 電源電圧:2.7~5.0[V] 周波数:80~550[MHz] | N、Ne、 Ar、Kr | SEL、SEU、出力異常 | 2 |

※SEE 発生状況及びマシンの都合により Kr の照射は実施していない。

各試料の概要と測定項目を以下に示す。

(1) イメージセンサ

イメージセンサは、宇宙での撮像の際に使用される。イメージセンサはカバーガラス有無の 2 つの条件で試験を実施した。試験時は画像取得を行い、画像異常の確認を実施し、SEL を検出するため消費電流を測定した。照射試験時の観測フローを図 1 に、観測内容の詳細を以下に示す。

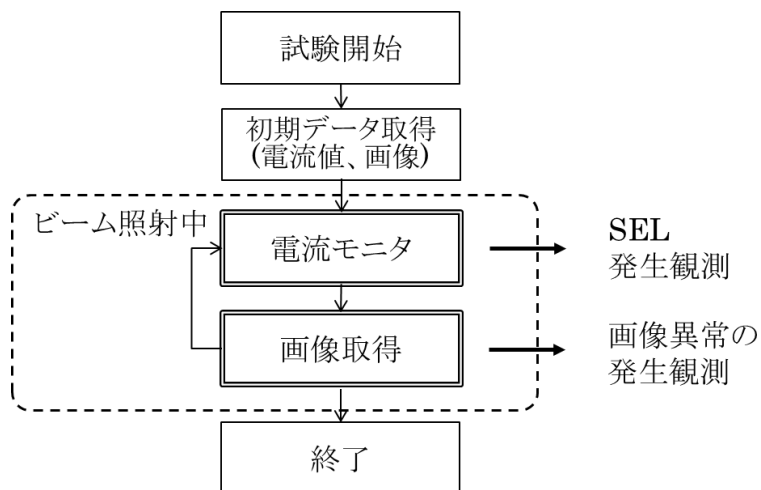


図 1 照射試験時の観測フロー

(a) SEL

SEL は、ビーム照射中にイメージセンサの消費電流をモニタすることで観測した。消費電流が以下に示す閾値以上に増加した場合、SEL 発生と判断し、発生回数をカウントすることとした。また、同時にイメージセンサの電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行うこととした。イメージセンサの SEL 判定閾値は通常動作時消費電流を考慮し設定した。

- SEL 判定閾値: 565.0 [mA]

(b) 画像異常

ビーム照射中にイメージセンサの画像取得を行い、画像異常の確認を行った。

(2) メモリ

メモリは、コンポーネント内で CPU のプログラム動作及び一時データ保存に使用する。本試験では SEL、SEU、異常動作の確認を実施した。照射試験時の観測フローを図 2 に、観測内容の詳細を以下に示す。

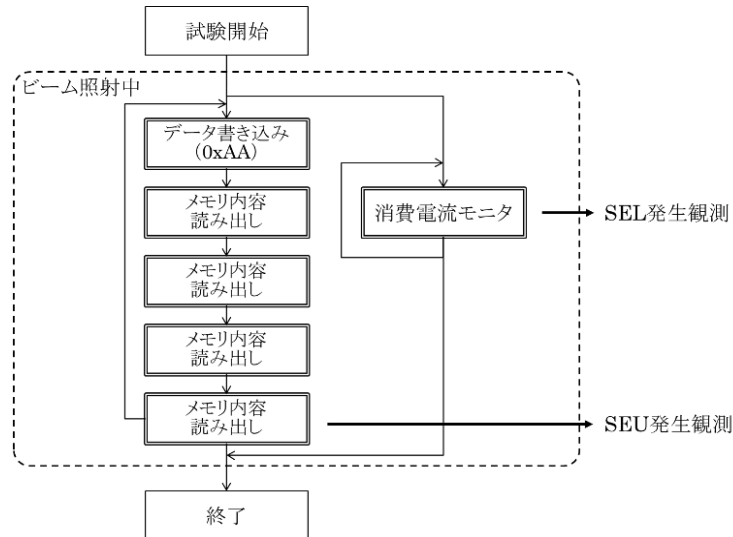


図 2 照射試験時の観測フロー

(a) SEL

SEL は、ビーム照射中にメモリの消費電流をモニタすることで観測した。消費電流が閾値以上に増加した場合に、SEL 発生と判断し、発生回数をカウントした。また、同時にメモリの電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行うこととした。メモリの SEL 判定閾値は通常動作時消費電流の約 2 倍とした。

- SEL 判定閾値：34.0 [mA]

(b) SEU

SEU は、ビーム照射中のメモリ状態をモニタすることで観測した。

メモリには 0xAA (2 進数：10101010) を書き込み、SEU 発生状況をモニタした。書き込み動作についてもモニタするため、定期的にメモリへの値書き込みを行った。

- 対象領域：512 [KB] (全領域 1 [MB] 中)
- 書込データ：監視を行う領域全体に 0xAA を書き込む
- 書込み・読出し動作：書込み 1 回 (全領域)、読出し (全領域) 4 回を 1 サイクルとする

(c) 異常動作

異常動作は、ビーム照射中のメモリへの書込み及び読出し動作をモニタすることで観測した。異常動作とは SEL や SEU とは異なる動作全てを指す (例：アドレス読出しエラーや一定値エラー等)。

(3) DA コンバータ

DA コンバータは、コンポーネント内でデジタル信号をアナログ信号に変換する際に使用される。本試験では SEL、SEU、異常動作の確認を実施した。照射試験時の観測フローを図 3 に、観測内容の詳細を以下に示す (DA コンバータと PLL シンセサイザは同じマシンタイムで照射試験を実施したため、フローは同じである)。

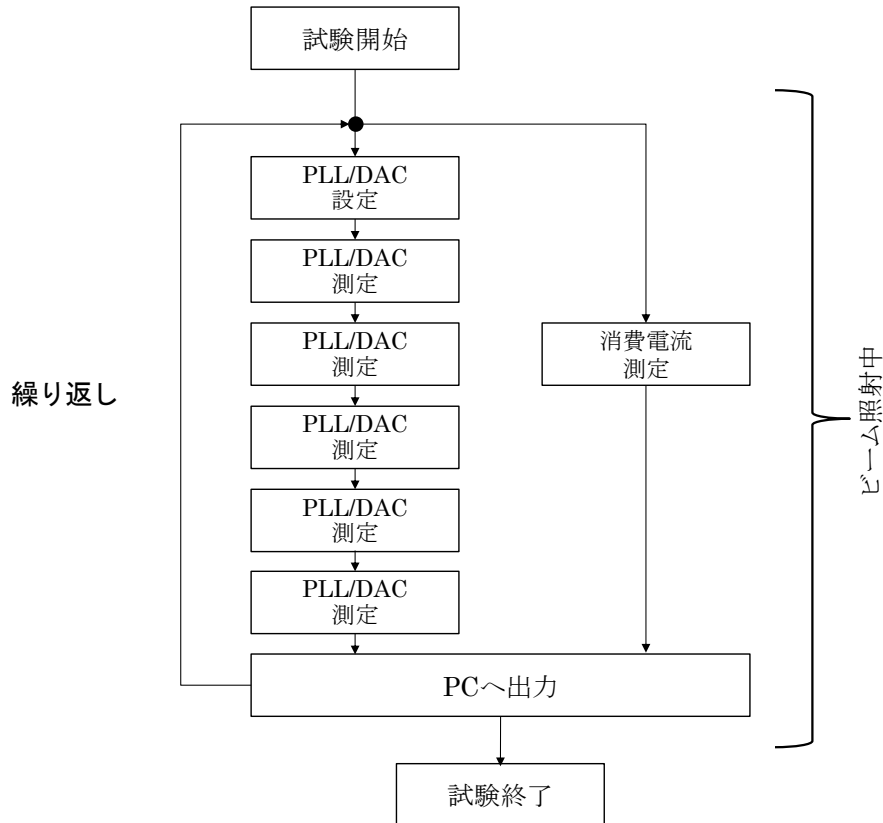


図 3 照射試験時の観測フロー

(a) SEL

SEL は、ビーム照射中に DA コンバータの消費電流をモニタすることで観測した。消費電流が以下に示す閾値以上に増加した場合に、SEL 発生と判断し、発生回数をカウントした。また、同時に DA コンバータの電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行うこととした。

DA コンバータの SEL 判定閾値は通常動作時消費電流の約 2 倍とした。

- SEL 判定閾値：110.0 [mA]

(b) SEU

SEU は、ビーム照射中に DA コンバータを動作させ、DA コンバータからの出力をモニタすることで観測した。SEU 発生状態が継続する場合は、電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行った。

- SEU 判定条件：設定した D/A 値に対応しない電圧が DA コンバータから出力された場合、SEU が発生したと判定する。

(c) 異常動作

異常動作は、ビーム照射中に DA コンバータを動作させ、DA コンバータからの出力をモニタすることで観測した。異常動作が発生した場合は、電源リセットを行い正常復帰することを確認した。

- 想定した異常動作
 - ・ 設定値を変化させても DA コンバータ出力が変化しない状態
 - ・ SEL/SEU に該当しない状態

(4) PLL シンセサイザ

PLL シンセサイザは、コンポーネント内で任意の周波数の信号を生成する際に使用される。本試験では SEL、SEU、異常動作の確認を実施した。照射試験時の観測フローを図 3 に、観測内容の詳細を以下に示す。(DA コンバータと PLL シンセサイザは同じマシントイムで照射試験を実施した。)

(a) SEL

SEL は、ビーム照射中に PLL シンセサイザの消費電流をモニタすることで観測した。消費電流が以下に示す閾値以上に増加した場合に、SEL 発生と判断し、発生回数をカウントした。また、同時に PLL シンセサイザの電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行うこととした。

PLL シンセサイザの SEL 判定閾値は通常動作時消費電流の約 2 倍とした。

- SEL 判定閾値：3.3V 系 9.0 [mA]
- 5.0V 系 0.7 [mA]

(b) SEU

SEU は、ビーム照射中に PLL シンセサイザを動作させ、PLL シンセサイザの出力をモニタすることで観測した。SEU 発生状態が継続する場合は、電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行った。

- SEU 判定条件：設定周波数と異なる周波数でロックし出力され、継続した場合に SEU と判定する。

(c) 異常動作

異常動作は、ビーム照射中に PLL シンセサイザを動作させ、PLL シンセサイザからの出力をモニタすることで観測した。異常動作が発生した場合は、電源リセットを行い正常復帰することを確認した。

- 想定した異常動作
 - ・ 特定周波数でロックしない状態
 - ・ Lock Detect の出力異常状態
 - ・ SEL/SEU に該当しない状態

3. 結果及び考察

各試料の試験結果を以下に示す。

(1) イメージセンサ

イメージセンサの試験結果を表 2 に示す。試験の結果、カバーガラス有の条件では全ての線種で SEL、画像異常は発生しなかった。カバーガラス無の条件では Kr 照射時に SEL が発生し、Ne、Ar、Kr 照射時に異常動作(制御ソフトの異常)が発生した。また、カバーガラス無の条件では、取得画像に縦筋や横筋、白くつぶれてしまうような画像異常が見られた。試験結果から解析を行い、SEE、画像異常の発生頻度を算出した。また、異常動作は電源リセットで正常復帰することが確認できた。

表 2 イメージセンサ 試験結果

| 試験条件 | 確認項目 | LET 閾値 [MeV/mg/cm ²] | 反転断面積 [cm ²] | SEE 発生頻度 [event/year] |
|---------|----------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| カバーガラス有 | SEL | 34 | 9.10E-07 | 1.13E-09 |
| カバーガラス無 | SEL | 14 | 1.54E-06 | 8.08E-06 |
| | 異常動作(制御ソフトの異常) | 3 | 3.33E-06 | 8.10E-04 |

(2) メモリ

試験の結果、全ての線種で SEL、異常動作は発生せず、N、Ne、Ar 照射時に SEU が発生した。試験結果から解析を行い、SEE の発生頻度を算出した。メモリの評価結果を表 3 に示す。

表 3 メモリ 試験結果

| 確認項目 | No | LET 閾値 [MeV/mg/cm ²] | 反転断面積 [cm ²] | SEE 発生頻度 [event/year] (SEU は[event/bit/year]) |
|------|----|-------------------------------------|-----------------------------|---|
| SEL | 1 | 14 | 9.84E-07 | 6.53E-06 |
| | 2 | | | |
| SEU | 1 | 0.001 | 1.98E-08 | 1.57E-06 |
| | 2 | 0.001 | 1.88E-08 | 1.45E-06 |

(3) DA コンバータ

試験の結果、Ar、Kr 照射時に SEL、Ne、Ar、Kr 照射時に SEU、Kr 照射時に異常動作が発生した。試験結果から解析を行い、SEE、異常動作の発生頻度を算出した。SEL、異常動作発生時は、電源リセットを行い正常復帰することを確認した。DA コンバータの評価結果を表 4 に示す。

表 4 DA コンバータ 試験結果

| 確認項目 | No | LET 閾値 [MeV/mg/cm ²] | 反転断面積 [cm ²] | SEE 発生頻度 [event/year] |
|------|----|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| SEL | 1 | 5.9 | 9.86E-05 | 4.60E-03 |
| | 2 | 5.9 | 1.52E-04 | 7.08E-03 |
| SEU | 1 | 0.041 | 7.44E-04 | 2.60E-01 |
| | 2 | 0.014 | 8.19E-04 | 3.78E-01 |
| 異常動作 | 1 | 14 | 7.59E-06 | 4.12E-05 |
| | 2 | 34 | 7.59E-06 | 9.43E-09 |

(4) PLL シンセサイザ

試験の結果、全ての線種で異常動作は発生しなかった。また、Kr 照射時に SEL、Ne、Ar、Kr 照射時に SEU が発生した。試験結果から解析を行い、SEE の発生頻度を算出した。SEL 発生時は、電源リセットを行い正常復帰することを確認した。PLL シンセサイザの評価結果を表 4 に示す。

表 5 PLL シンセサイザ 試験結果

| 確認項目 | No | LET 閾値 [MeV/mg/cm ²] | 反転断面積 [cm ²] | SEE 発生頻度 [event/year] |
|------|----|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| SEL | 1 | 14 | 1.91E-06 | 1.04E-05 |
| | 2 | 34 | 9.57E-07 | 1.91E-09 |
| SEU | 1 | 0.001 | 1.34E-05 | 1.22E-02 |
| | 2 | 0.001 | 1.44E-05 | 1.31E-02 |

以上の通り、イメージセンサ、メモリ、DA コンバータ及び PLL シンセサイザについて重粒子線照射試験を実施した。その結果、イメージセンサはカバーガラス有の場合、SEL、画像異常の発生は見られなかった。カバーガラス無の場合は SEL、画像異常及び異常動作の発生が見られた。メモリは、SEU の発生が見られた。また、SEL、異常動作の発生は見られなかった。DA コンバータは、SEL、SEU 及び異常動作の発生が見られた。PLL シンセサイザは、SEL、SEU の発生が見られた。また、異常動作の発生は見られなかった。イメージセンサ、DA コンバータ及び PLL シンセサイザは SEL、異常動作が発生した場合でも電源リセットにより問題なく動作が回復することを確認した。

試験の結果から、試料の使用を想定している軌道条件における SEE 及び異常動作の発生頻度を算出した。メモリの SEU、DA コンバータの SEL、SEU 及び PLL シンセサイザの SEU の発生頻度は想定している 1 年という運用期間に対して大きく、十分な耐放射線性を有さないことが確認できた。よって、実用の際は、発生頻度を考慮した設計とする必要がある。イメージセンサの画像異常についても、全線種での発生が見られたため、設計時に考慮する必要がある。イメージセンサの SEL、異常動作、メモリ、PLL シンセサイザの SEL 及び DA コンバータの異常動作の発生頻度は想定している 1 年という運用期間に対して小さく、十分な耐放射線性を有することが確認できた。

最後に試料である民生電子部品は、宇宙環境での使用を想定して製造されたものではないため、本試験の結果が部品自身の性能・機能の優劣を示すものではないということを付記しておく。