

学位論文の要旨

氏名

木本 雄吾

学位論文題目

RADFETによる宇宙機環境におけるトータルドーズ計測法

軍事技術を背景とした人工衛星等宇宙機開発は、概して厳しい耐放射線設計要求を課してきていた。これまでは、耐放射線設計として、耐放射線性のある半導体デバイスを国内で開発、若しくは海外から輸入して使用してきたが、冷戦の終結あるいは、民生半導体部品の爆発的な発達等が原因で、先進的な耐放射線性電子部品の入手が困難となり、放射線に弱い民生用電子部品を使用せざるを得なくなった。更に10年を超える設計寿命が要求されることもしばしばあり、今後の電子部品の被曝線量は明らかに増える傾向にある。また日本の衛星メーカは海外向けコンポーネントと比べて国内向けコンポーネントの耐放射線設計のシールドが厚いため、質量が大きく、トータルドーズ設計が過剰であると指摘している。そのため、宇宙機内部のコンポーネント及び電子部品の被曝線量（トータルドーズ）の計測の必要性が言われてきた。昨今、最新電子部品技術の軌道上実証実験が中・小型衛星を使って行われており、搭載電子部品のトータルドーズを把握したいというニーズもある。本論文は、そのような背景から、RADFET (Radiation sensitive Field Effect Transistor) を使用した宇宙機環境におけるトータルドーズ計測手法とそのフライトデータの解析結果についての研究をしたものである。

最初に、トータルドーズを計測するセンサ即ち線量計について調査し、本研究で使ったRADFETの校正手法について議論した。宇宙放射線によるトータルドーズ効果を評価する手法については、電離損傷を模擬する γ 線を用いたMIL-STD-883 Method1019.6に基づいて行うことが国際的に主流である。したがって、過去の衛星搭載用RADFETの校正照射試験は γ 線を主に行われており、宇宙放射線の効果で支配的である電子及び陽子での照射試験は十分行われていなかった。本論文では電子($E=1\text{MeV}$)及び陽子($E=13,25,41,60,70\text{MeV}$)で照射試験を行い、 γ 線照射試験結果と比較し、 γ 線のみによる校正試験技術を評価した。電子線照射によるトータルドーズは γ 線校正試験と同じであった。一方、陽子線照射試験では、 $13\text{MeV}\sim 60\text{MeV}$ のエネルギーにおいて γ 線校正試験結果の約80%であった。また 60MeV 及び 70MeV のエネルギーにおいては γ 線照射試験結果と同じであった。陽子の影響が支配的なシールド厚約 10mm を超える場合は計測誤差が比較的大きいものの、トータルドーズ効果に影響のある電子線及び陽子線環境下でのRADFETによる計測が、比較的簡易な γ 線照射試験で校正できることを示した。

またRADFETを使用した計測の問題点であるアニール（フェーディング）効果のデータを取得し、補正手法について検討した。アニール効果の影響は時間に対して指数関数的に減少する。この応答関数を利用し、アニール効果を含んだ計測値をデコンボリューションすることで、アニール効果を含まない計測値を導く手法でアニール効果を補正した。

これまでのRADFETによる計測例を見ても、アニール効果の補正は行われておらず、RADFETによる精度の高い計測を可能とする本論文の成果の一つである。

次にRADFETの計測原理、過去の計測例を踏まえ、MDS-1 (Mission Demonstration Satellite -1) 搭載用トータルドーズ計測装置 (積算吸収線量計: DOS) 及びその校正技術について検討した。MDS-1搭載用に選択したRADFET400nmIMPLについて、特性のばらつき及び温度依存性、計測誤差についての検討を行った。またMDS-1搭載用DOSセンサ自体の形状の影響 (シールド厚) について、材料・構造データを基にRay-traceを使用して検証し、フライトデータ解析に必要なシールド厚値を得た。

以上前半で行った照射試験結果及びアニールデータ補正技術をフライトデータ処理へ反映し、MDS-1搭載用DOSセンサのフライトデータを解析した。MDS-1は、将来宇宙機の小型・高性能・低コスト化を目的とする民生部品・コンポーネント実証衛星で、太陽活動極大期である2002年2月4日に打ち上げられた。宇宙放射線環境の厳しいバンアレン帯を通過する静止トランスファー軌道において約20ヶ月運用された。MDS-1搭載用DOSセンサは56個存在し、8個はそれぞれ厚みの異なるアルミニウムの半球(0.7,3,6,10mm)で覆われているDOSセンサシールドモジュール (DOS-SSM) に配置され、残りの48個は衛星構体パネルの内側、各実験機器コンポーネント内部に配置された。本論文ではDOS-SSMのデータ (2002年2月26日~2003年9月22日) を解析した。

次に宇宙放射線電子モデル (AE-8) /陽子モデル (AP-8) のデータ及びMDS-1へ同じく搭載された宇宙放射線スペクトルメータ (SDOM) で取得した電子/陽子の実環境データを変換プログラムであるSHIELDOSE-2でトータルドーズに換算し、DOSセンサの実測値と比較した。AE-8、AP-8は米国NASAが1958年から1978年にかけて衛星で取得したデータを基に構築した捕捉放射線モデルで、現在デファクトスタンダードとして衛星設計に使われている。シールド厚2.7mmにおける実測値はモデル値とほぼ同じであった。しかしそれを越えるシールド厚ではモデル値の方が約50%少なかった。実測値の内挿から2.7mmより薄いシールド厚ではモデル計算が過大な評価をしている可能性が高いと考えられる。この結果は、民生用電子部品のトータルドーズ設計をより薄いシールド厚での使用へと拡大できることを示す。2.7mmを超えるシールド厚では逆にモデル計算が過小な評価をしている可能性が高い。これは宇宙放射線陽子モデルが、陽子線環境を過小評価していることが原因と考えられる。SDOMで取得した陽子の実環境データと陽子モデルとを比較した結果、同様に、陽子モデルが陽子フルエンスを過小評価している結果が得られた。しかしながら、トータルドーズはシールド厚が薄い所より約1桁以上小さいので、耐放射線設計への影響は少ないと考えられる。

論文審査の要旨

報告番号	理工研 第283号	氏名	木本 雄吾
審査委員	主査	亀野 誠二	
	副査	鍵山 茂徳	西尾 正則
		越石 英樹	面高 俊宏

学位論文題目 RADFETによる宇宙機環境におけるトータルドーズ計測法

(A total dose measurement technique using RADFETs in spacecraft environment)

審査要旨

提出された学位論文及び論文目録等を元に学位論文審査を実施した。本論文はRADFET(放射線量測定用電界効果トランジスタ)を用いた照射試験方法を確立し、宇宙機の耐放射線設計について提案するものである。全5章から構成されている。本研究の内容は学位論文審査請求の段階ですでに査読誌に2報が出版されている。

第1章の序論では宇宙機搭載機器の耐放射線照射試験の必要性について述べ、本研究の主題であるRADFETを用いた γ 線照射試験の重要性を正当化している。

第2章では、RADFETを用いた γ 線照射試験で放射線照射試験を模擬する方法を提案し、その際の校正方法を確立して、有用性を検証したものである。宇宙環境でのトータルドーズ効果は陽子・電子による電離損傷が主要であるが、 γ 線照射でこれを模擬できれば、地上試験が安価で容易に行なえる。そこで本研究ではRADFETへの γ 線照射と電子線・陽子線照射との比較をして、 γ 線照射から電子・陽子トータルドーズへ換算を行なう校正式を、導出した。その際に照射後の時間経過で起こるアニール効果が問題となるが、これを指数関数のデコンボリューションによって補正し、校正式の精度を高めた。さらに、機器の自己遮蔽の影響を、放射線のRay Traceによって補正している。

第3章では、つばさ(MDS-1)衛星搭載のRADFETおよび粒子線観測機器SDOMのフライトデータを用いて、静止トランスファー軌道における放射線環境モデルの有効性を検証している。従来のモデルが予測するトータルドーズは、シールド厚3 mm以下では過大評価であった。この結果は民生品使用時のシールドをより薄くできる可能性を示している。一方で耐放射線設計においてシールド厚が5 mm以上のときに1/2 - 1/3の過小評価であることを指摘したが、その影響が出るのは100 Gyを越えるトータルドーズの場合で、実際には影響が小さいことも示した。

第4章では衛星設計への反映について述べている。2,3章で得られた校正式およびモデルに対する問題点を元にして、現実的で有用な耐放射線設計の方法を提案し、流れ図によって具体的に示している。

これら、本研究で得られた宇宙機の耐放射線設計についての知見を、第5章でまとめている。

以上本論文は、RADFETを用いた放射線照射試験方法を確立し、その結果を人工衛星のフライトデータに適用して従来の軌道上放射線環境モデルの問題点を明らかにし、衛星設計の改良を提案したものである。この研究結果は、民生品の人工衛星への使用による高性能化・低コスト化に貢献するもので、高い価値があると認められる。よって審査委員会は博士(理学)の学位論文として合格と判定する。

最終試験結果の要旨

報告番号	理工研 第283号	氏名	木本 雄吾
審査委員	主査	亀野 誠二	
	副査	鍵山 茂徳	西尾 正則
		越石 英樹	面高 俊宏

主査及び副査を含む9名の出席の元で、平成20年1月28日14時30分より、学位申請者木本雄吾氏による学位論文の発表を約1時間に渡って行ない、引き続き約1時間に渡って内容および関連事項についての質疑応答を行なった。最終試験に相当する質疑応答の主要なものは以下の通りである。

問) RADFETがSDOMやモデルより信頼できる根拠は何か？

答) SDOMについては、他の粒子線観測機器との測定結果のずれがあることが、他の衛星でも報告されている。一方で、RADFETは地上での試験が十分になされていて、信頼性が高い。一方で、モデルは実際に近いエネルギースペクトルを元につくっているが、RADFETはmono energetics (単一のエネルギー) での測定であるという問題がある。

問) 地上では電子と陽子とを別々に照射しているが、軌道上では両方が同時に入射する。その違いによる影響は考慮したか？

答) 地上で両方を同時に計測する方法がないので、別々に照射試験することはやむを得ない。SDOMはエネルギースペクトルを計測できるので、電子と陽子の分離を試みている。それがSDOMでRADFETより過大な評価が得られた原因かと考える。

問) 陽子が発生する2次電子線の影響は考慮したか？

答) 考慮している。この補正のために、RADFETの計測データには補正係数をかけている。

問) RADFETの校正式やアニールに温度依存性はみられたか？

答) RADFETでは120°C以下の条件では温度依存性がほとんど見られなかった。アニール効果については温度依存性が見られたので、それを補正した。

問) 従来のモデルは線量が過大評価なので、民生品のシールドをもっと薄くできると主張しているが、100 Gyのトータルドーズでは過小評価でシールド厚を増やす必要があるのではないか？

答) 100 Gy付近では、従来のモデルは陽子を過小評価していた、ということが本研究で明らかになった。100 Gy付近では民生品はもっとシールドを厚くする必要あるが、100 Gyものトータルドーズを受ける環境は実際にはあまりないので、過小評価の影響は小さいと考える。

問) 補足電子・陽子や太陽フレアの他に、銀河宇宙線の影響は考えなくてよいのか？

答) フラックスが小さいのでトータルドーズには効かない。

以上のように、質疑応答は専門的で高い水準のものであったが、木本氏は質問に対してほぼ的確に回答した。以上の試験結果に基づき、5名の審査員は木本氏が大学院博士後期課程修了者として十分な学力と研究能力を有すると判断し、最終試験を合格と判定した。