

アニール効果を考慮した総吸収線量計測データについて

○ 鋤田大日(鹿児島大学)、木本雄吾(宇宙航空研究開発機構)、越石英樹(宇宙航空研究開発機構)

The measurement total dose data considered the annealing effect

Dainichi Sukita (Kagoshima University) and Yugo Kimoto (JAXA), Hideki Koshiishi (JAXA)

Key Words: Total Dose, Annealing effect, RADFET

Abstract

Evaluation of total dose in spacecraft design has to have sufficient accuracy in order to avoid shortening spacecraft's lifetime, leading an improvement of models used in spacecraft design so as to have higher reliability by observing actual space radiation environment. However measured total dose data shall be underestimated due to annealing effect. In this presentation, total dose data corrected annealing effect and non-corrected data measured by TSUBASA satellite are discussed.

1. 目的及び背景

衛星設計時における総吸収線量(トータルドーズ)の評価は、過少評価による衛星寿命の短縮を防ぐために十分な精度が求められる。更に評価の信頼性を上げるためには実放射線環境の計測による評価モデルの精度向上が必要である。実環境で吸収線量を左右する現象は、太陽高エネルギー陽子イベント、放射線帯の高エネルギー陽子、磁気嵐による高エネルギー電子の増加が主に挙げられる。

このような環境の中で計測する線量計は、宇宙機が曝される熱・衝撃などの環境に適合することや小型で省電力であることが要求される。そのような要求の中で RADFET は 1 つ当りの重量が非常に軽く、単純な回路で構成されているために 1970 年代から衛星搭載の線量計として利用されてきている。しかしこのデバイスを用いた計測では、アニール効果の影響を受けるために計測値は実際の値よりも過少評価されている可能性がある。本講演では、アニール効果を補正した総吸収線量計測データを示すとともに、補正していない計測データとの比較考察を行う。

2. RADFET について

RADFET(RADiation sensitive Field Effect Transistor、図 1)は MOS 型トランジスタと同じ構造で、高エネルギー粒子の入射量によって閾値電圧が変化することを利用して被ばくした総線量を計測する機器である。

簡単に RADFET の原理を紹介する。ゲート酸化膜に入射した高エネルギー粒子は正孔と自由電子を生成し、生成された正孔はゲート酸化膜に蓄積されて

いく。この生成された正孔の量を電氣的に測定することで RADFET に入射した総線量を計測できる。RADFET の場合、蓄積された正孔の量はトランジスタの閾値電圧の変化に現れる。入射する線量が多くなるにつれて、RADFET の閾値電圧も大きくなる。このことから RADFET のゲート酸化膜の厚さはより多くの正孔を蓄積させるために一般的な MOS 型トランジスタに比べて約 400nm と厚めに設計されており、放射線に対する感受性を高めている。

今回用いた RADFET の計測の流れは、20 分間 RADFET を放射線環境に曝した後(図 2: Exposure mode)、10 μ A の電流がソース・ドレイン間に流れる状態でのゲート電圧を計測するという流れを繰り返している(図 2: Measure mode)。つまり記録データは 20 分おきに計測されることになり、計測されたゲート電圧は 12bit で量子化されて記録される。実際に換算すると、ゲート電圧は 0.005[V]刻みで記録されている。

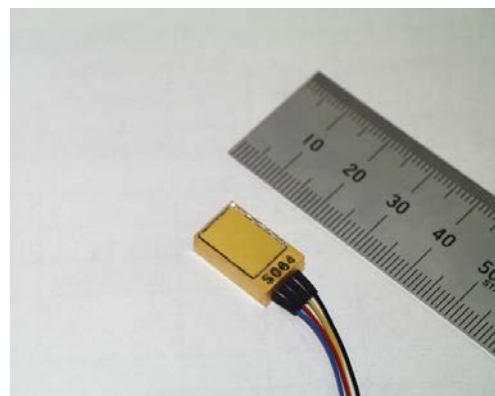


図 1 RADFET の外観

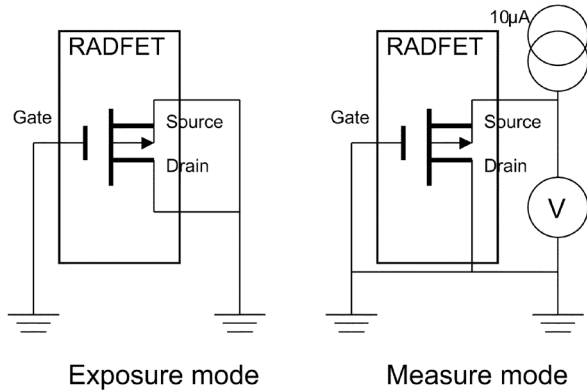


図2 RADFET の計測モード

3. アニール効果について

アニール効果とは半導体と接する絶縁体に電子がトンネル効果によって流れ込む現象である[1]。RADFET は絶縁体であるゲート酸化膜に蓄積された正孔の量を電氣的に測定することで総線量を計測する。しかしゲート酸化膜に電子が流入すると酸化膜内の正孔と再結合し正孔の数が減少してしまう。このため計測・算出される総線量の値は真の値に比べて少ない値になることが予想されている。実際にいくつかの研究では実験的にアニール効果は確認されているが[2]、今までの RADFET を用いた線量計測ではこのアニール効果を補正していないために過少評価されたデータをそのまま結果として利用していた可能性がある。

4. MDS-1 について

今回の研究では JAXA が 2002 年 2 月から 2003 年 9 月にかけて運用した MDS-1(つばさ)の宇宙環境計測データを使用した。MDS-1 は民生コンポーネントの宇宙機実証を目的とした衛星で、放射線環境の過酷な静止遷移軌道(GTO)に投入され約 1 年半運用された。以下に MDS-1 の主要緒元を示す[3]。

運用期間	2002/02/04 ~ 2003/09/27
打ち上げ時重量	480kg (打上時)
形状寸法	1.2m × 1.2m × 1.5m
軌道	近地点 500km 遠地点 36000km 傾斜角 28.5° 周期 10h35m
姿勢制御方式	スピン安定方式 周期 5rpm

表 1 MDS-1(つばさ)の主要緒元

積算吸収線量計は、宇宙放射線粒子による MDS-1 内部の各点における総被曝量(積算吸収線量)を、MDS-1 機体各部に配置したセンサで計測する。積算吸収線量計は積算吸収線量計回路部(DOS-E: Dosimeter Electronics、図 3)積算吸収線量計センサ(DOS-S Dosimeter sensor)、および 2 台の積算吸収線量計センサシールドモジュール(DOS-SSM: Dosimeter sensor shield module、図 4)で構成されており、民生部品・衛星バスコンポーネント実験機器内部及び MDS-1 構成パネルの合計 56 箇所で積算吸収線量を計測する。

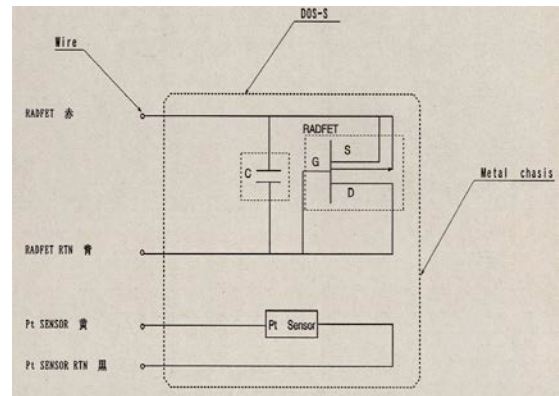


図3 DOS-S の構成



図4 DOS-SSM の外観

DOS-SSM は太陽方向(スピン軸方向)と、スピン軸に垂直な方向にそれぞれ厚さが 0.7mm、3.0mm、6.0mm、10.0mm のアルミの半球シールドを設置しての中に DOS-S が配置された。また、DOS-S や DOS-SSM の各 RADFET には白金温度センサが RADFET と対で配置されており(図 3 参照)、それぞれの RADFET が設置されている箇所の温度環境を記録できるようになっている。

5. アニール補正

RADFET のアニール応答は先行研究[4]において地上実験で計測されていたので、そのデータを用いてアニール効果の応答関数を導き出した。その応答関数を用いて、ある時間の総線量値はそれ以前の入力とアニール応答関数の畳み込みであると仮定し、逆畳み込みを用いてアニール効果を補正した。応答関数は、放射線を照射し終わった時点での RADFET 閾値電圧を基準として時間 T [hr] が経過した時の閾値電圧の相対値を Y とすると、以下の応答関数が得られた。

$$Y = 0.86 T^{-0.034}$$

Y: RADFET 閾値電圧の照射終了時に対する相対値

T: 照射終了からの経過時間[hr]

今回使用した計測データは20分間隔で総線量が計測されているので、上記の応答関数を用いて離散的な逆畳み込みを行い、20分間隔の補正線量値を算出した。

6. 線量率データの補正結果・考察

補正を行わない線量率のデータは、データ点の前後の差をとることで計算することができる。補正していない線量率データは図5のように計測期間を通じてほぼ一定の線量率を示している。また運用期間が太陽活動極大期であったにもかかわらず、太陽フレアイベントなどによる影響があまり現れていない。図5のグラフに複数の線が見えるのは、計測値が量子化されて記録されているので線量率にもその影響が出ているためである。

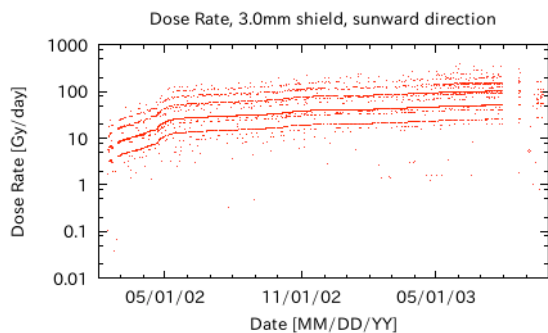


図5 アニール補正前の線量率(3.0mm Al 遮蔽)

補正していない線量率を一日平均してグラフ化すると図6に示すように大まかな線量率の増減が確認できた。また、2002年4月下旬に発生したフレアによる線量率増加も確認できた。しかし、この結果では数時間間隔の線量率の変化を追うことは難しい。

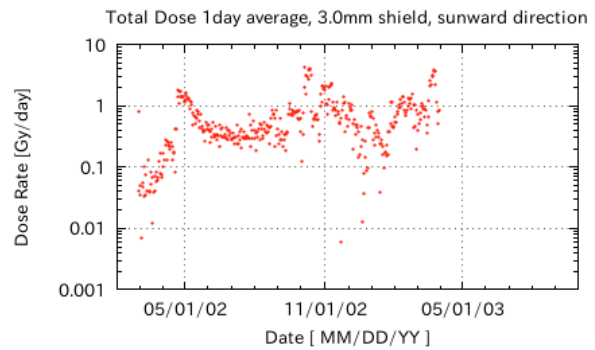


図6 アニール補正前の線量率(3.0mm Al 遮蔽、一日平均値)

計測データに対してアニール補正を行うと図7のような結果が得られる。補正前後のグラフを比較すると補正前には見えなかった線量率の詳細な連続的な変化が得られるようになった。ただし、量子化の影響は補正することはできず、図7の線量率が30~40[Gy/day]辺りの箇所には依然としてその影響が残っている。しかし図6のような補正前の線量率を一日平均してプロットしたグラフと比較しても、より詳細な線量率の変化が得られることが分かった。このことから、実環境におけるRADFETの計測データにアニール効果が効いており、逆畳み込みを用いてアニール効果を補正することでより詳細な線量率を導くことができると分かった。

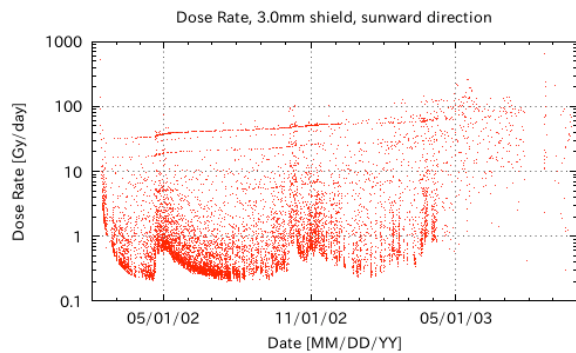


図7 アニール補正後の線量率(3.0mm Al 遮蔽)

7. 総線量データの補正結果・考察

図8に総線量の補正前後のグラフを示す。計測終了時の総線量はアニール補正前が577.8[Gy]、補正後は1189.3[Gy]とほぼ倍になっていた。他のアルミニウム遮蔽(0.7mm、6.0mm、10.0mm)においても同様に補正前後で計測終了時の総線量値は約2倍になった。

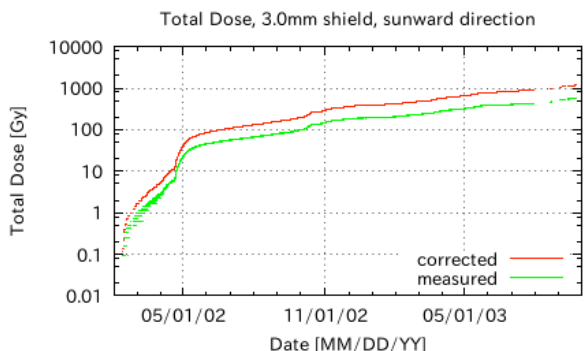


図 8 アニール補正前後の総線量値(3.0mm Al 遮蔽)

ただしこの結果ではアニール効果のみを補正しているため、RADFET の温度特性や記録時の量子化による影響は依然として残っていると思われる。

またアニール効果を補正したところ総吸収線量が一番多かった箇所は、衛星構体パネルの表面に設置された箇所(0.7mm アルミ遮蔽、4024.8[Gy])で、逆に最も少なかった場所は衛星内部にある磁力計コントロール基盤内(205.4[Gy])でその差はおよそ 200 倍であった。

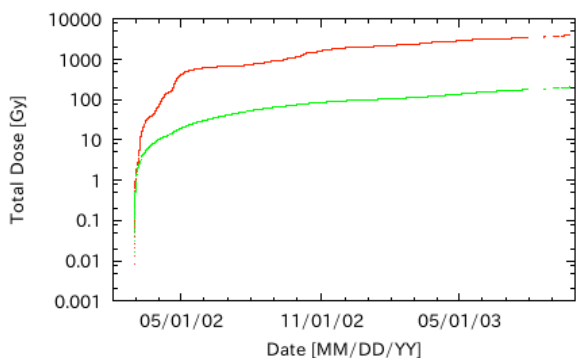


図 9 総吸収線量の最大箇所と最少箇所の比較

現在の衛星設計においては衛星外部・内部に関わらず同じ耐放射線対策が施された部品を使っているため、特に衛星内部の部品は実際の放射線環境と比較すると過大評価されている可能性がある。

8. 温度変化による影響の可能性と今後の課題

今回の計測データを解析すると、アルミ遮蔽厚が 0.7mm の場合だけ 2002 年 8 月頃のデータから線量率のデータがうまく補正できていなかった。これは 2002 年 8 月から衛星が食運用を始めた為に、衛星の温度変化が激しくなり、そのために RADFET が正確な値を記録できなかったのではないかと考えている。

その根拠として 0.7mm アルミ遮蔽が施された RADFET の温度変化と記録された閾値電圧の関係を

調べると、衛星が地球の影に入り温度が急激に下がる時に RADFET の閾値電圧が一時的な上昇を記録していた。その変化の様子を図 10 に示す。図 10 に示したグラフの期間は RADFET の平均的な閾値電圧が一定だったため、宇宙環境による影響は少ないと判断し、この期間を一例として載せる。

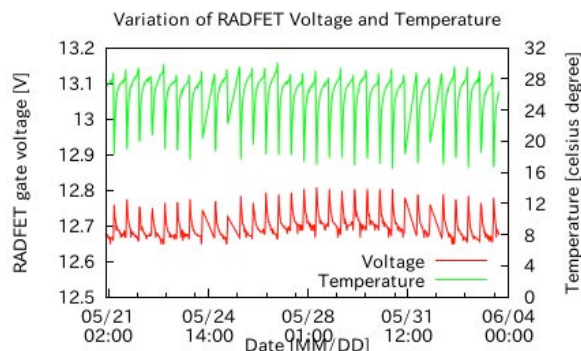


図 10 衛星内部温度と RADFET の閾値電圧の関係 (2003 年 5 月 21 日～2003 年 6 月 3 日)

図 10 から見て取れるように、RADFET 周辺の温度が下がると RADFET の閾値電圧は一時的に上昇している。そこで図 10 のデータを用いて、衛星が食に入った時の温度の減少量と、同じ時刻の RADFET における計測電圧の上昇量を計算し、図 11 に示す。

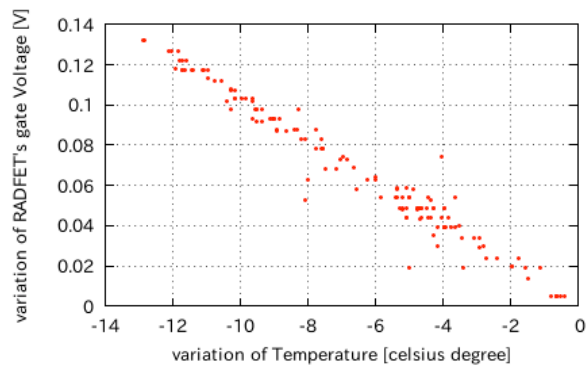


図 11 温度変化と閾値電圧変化の関係 (2003 年 5 月 21 日～2003 年 6 月 3 日のデータ)

図 11 の結果を見る限り温度変化と閾値電圧の一時的な上昇量には線形な関係がみられる。この影響を補正していないので、アルミ遮蔽厚が 0.7mm の RADFET ではアニール補正を行っても食運用期間中では正確な線量率が得られなかったのではないかと考える。

この問題を解決するための今後の課題として、温度変化による RADFET の閾値電圧の補正式を求める

必要がある。また本研究でのデータは、アニール効果の応答関数を除いて、すべて実宇宙放射線環境での計測データから得たものである。つまり時々刻々と予測不能に変化する放射線環境における計測値から求めた結果なので、より正確で詳細な RADFET の温度特性を知るためには、地上の実験室で温度を変化させて RADFET の閾値電圧変化を計測するなどの実験を行うことでより正確な RADFET の特性を得る必要がある。

9. まとめ

今回の研究では RADFET を用いた線量計測においてアニール効果が計測結果に効いていることを確認し、また逆畳み込みを用いてアニール効果を補正することが可能であることを示した。また、計測環境の温度変化も RADFET の計測結果に影響している可能性も発見した。

参考文献

- 1) F.B. McLean, A Direct Tunneling Model of Charge Transfer at the Insulator-semiconductor Interface in MIS devices, HDL-TR-1765, 1976
- 2) S. Stanic, Y. Asano, H. Ishino, Radiation monitoring in Mrad range using radiation-sensing field-effect transistors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 545, 252-260, 2005
- 3) Hideki Koshiishi: Space Environment Data Acquisition Equipment on board TSUBASA satellite, Space Radiation, Vol.4, No.2 (2004)
- 4) Yugo Kimoto: A total dose measurement technique using RADFETs in spacecraft environment, Dr thesis of Kagoshima University, 2007