

トータルドーズ計測結果と遮蔽設計への提案

木本雄吾、越石英樹、松本晴久、五家建夫（宇宙航空研究開発機構）

A proposal to shielding design and total dose measurement result
Yugo Kimoto, Hideki Koshiishi, Haruhisa Matsumoto, Tateo Goka (JAXA)

Key Word: Totaldose, Tsubasa, MDS-1, Space environment

Abstract

The total dose data from a Tsubasa (MDS-1) satellite, flying in a highly eccentric orbit, is analyzed. The total dose is measured by the small dosimeter utilizing RADFETs. 56 devices (denoted DOS-S) were mounted in several experimental components in the satellite. The total dose data behind certain Aluminum shield domes and in some experimental components have been analyzed. The total dose change is affected by electron flux in the thin shield. In thicker shield, electron and proton affect the total dose profile. The comparison between the flight data and model data were implemented.

1. はじめに

つばさ (MDS-1) は民生部品の軌道上評価、コンポーネントの事前実証及び宇宙環境計測をミッションとし[1]、2002年2月4日に打上げられ、2003年9月25日に運用を終了した。宇宙環境計測ミッションを行う宇宙環境計測装置 (SEDA) の内、宇宙放射線による放射線吸収線量 (トータルドーズ) を計測する積算吸収線量計 (DOS) によって計測されたフライトデータについて宇宙放射線環境、搭載位置と共に解析した結果について述べる。また計算モデルによるトータルドーズ予測とフライトデータの比較を行う[2]、[3]。

2. センサ取付位置

センサである積算吸収線量計センサ (DOS-S) は 56 個あり、8 個は積算吸収線量計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内側、各実験機器内部に配置されている。DOS-SSM は厚さの異なるアルミニウム半球を 4 つ (0.7, 3, 6, 10mm) 有しており、半球の中心に DOS-S が配置されている。DOS-SSM は 2 式 (DOS-SSM1 及び DOS-SSM2) あり、DOS-SSM1 は +Z 面 (太陽指向面)、DOS-SSM2 は -X 面 (スピン軸と直角な面) に向けて構体パネルの外部に搭載されている。Fig2-1 に DOS-SSM1 と 2 の搭載位置を示す。また軽粒子のエネルギースペクトルを

計測する放射線吸収線量モニタ (SDOM) は DOS-SSM2 と同じ衛星パネルに搭載されている。各実験機器内部へ搭載されている DOS-S については各々の機器の重要部品のトータルドーズの把握、機器のトータルドーズ設計の確認等の目的を考慮し、搭載場所が決定されている。Fig2-2 につばさ (MDS-1) 内部の各実験機器の配置場所、搭載された DOS-S の個数について示す。

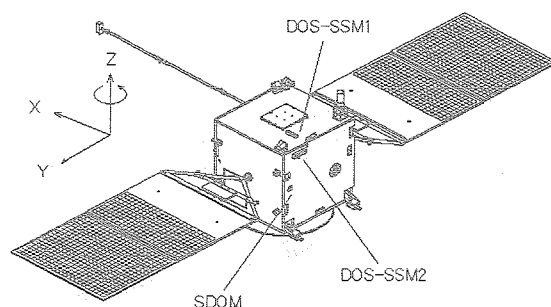


Fig. 2-1 The position of DOS-SSM1 & 2 and SDOM on MDS-1 satellite. Z axis is a spin axis. DOS-SSM1 is attached to +Z direction of the satellite, the other DOS-SSM2 is attached to -X direction. The field of view of SDOM is also -X direction.

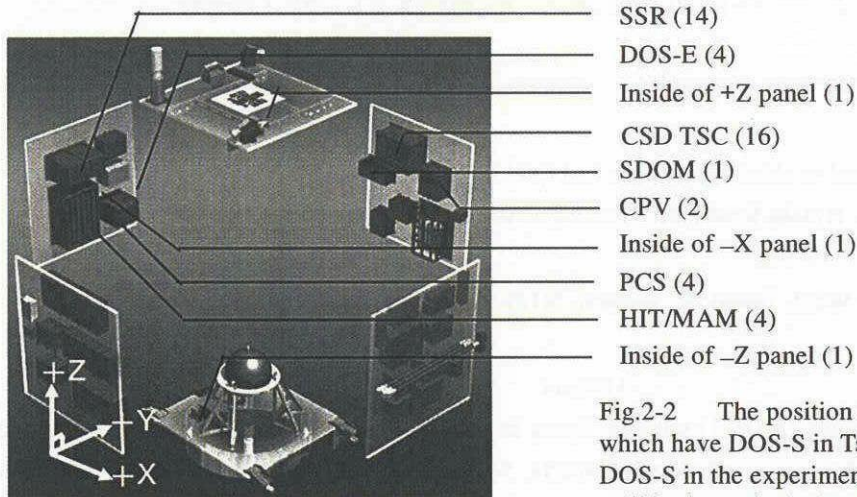


Fig.2-2 The position of the experimental components which have DOS-S in Tsubasa(MDS-1). The number of DOS-S in the experimental components and the satellite wall is shown in ().

3. 計測データと解析結果

DOSは2002年2月9日17:23(UT)にターンオンされた。その後、2002年2月10日2:20~3:30(UT)にチェックモードに移行され、チェックアウトが実施された。チェックアウトにおいて異常、その他問題は無く、計測モードに移行された。計測モードに移行初期、MDS-1のバス機器、実験機器のチェックアウトおよびシャント運用上の衛星電源オフ等の影響で、データおよび機器の状態が安定していない。よって、有効なデータ取得開始時期として、その後のDOSを含めた実験機器の温度が安定し、定常的な運用およびデータ取得がほぼ始まった2002年2月26日を基点とする。つばさ(MDS-1)の運用が終了する直前の2003年9月22日まで(574日間、1300周回)取得されたデータについて解析した。

Fig. 3-1にDOS-SSM2(-X方向)で取得されたトータルドーズの時系列変化を示す。半球シールド厚0.7、3、6、10mmについてそれぞれ、 2.21×10^3 、 5.94×10^2 、 1.40×10^2 、87.5Gy(Si)のトータルドーズであった。Fig. 3-2にDOS-SSM1及び2の温度変化を示す。2003年7月末以降を除いて、それぞれ平均27、20℃を約 $\pm 1^\circ\text{C}$ で変化しており、温度による計測データへの影響はほとんどないと考えられる。

次にトータルドーズと電子、陽子フラックスとの関係について解析した。E=0.5、1.6、2.8及び4.3MeV以上の電子とE=10.0、23.7、35.7、48.3MeV以上の陽子はそれぞれ0.7、3、6及び10mmの厚み

を有するDOS-SSMの半球シールドを貫通する。実際にはDOS-S自身のシールド効果が原因で、それらのエネルギーレベルより大きなエネルギーの粒子が貫通すると考えられる。

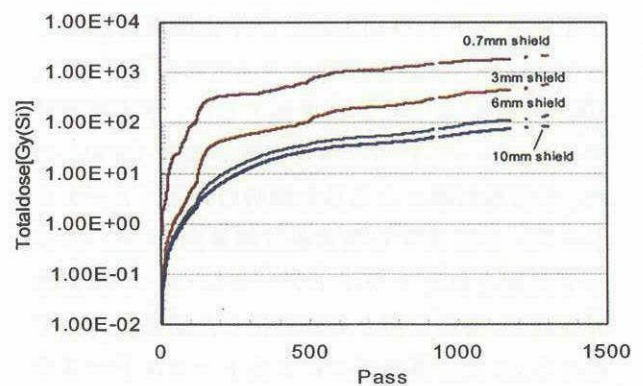


Fig.3-1 Total dose in four shield domes versus pass number in -X direction.

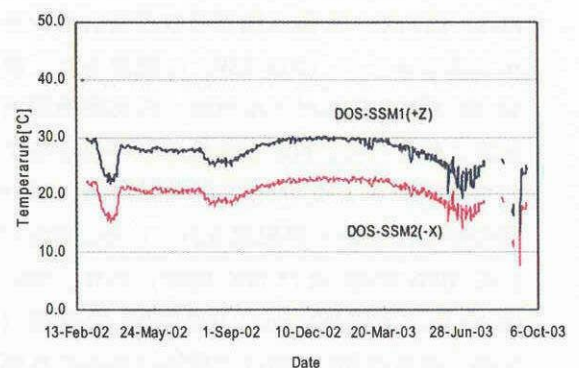


Fig.3-2 Temperature in DOS-SSM1 and 2 versus date.

Fig3-3 に半球シールド厚 0.7mm における一日あたりのドーズ変化量と SDOM で得られた $E=1.45\text{MeV}$ の電子フラックスの日変化を示す。ドーズ量変化と電子フラックスの挙動はほぼ一致しており、このシールド厚においてはエネルギー約 1MeV の電子がトータルドーズに影響を及ぼしていることがわかる。

Fig3-3 に半球シールド厚 6mm における一日あたりのドーズ変化量と SDOM で得られた $E=8.5\text{MeV}$ の電子フラックス及び $E=59\text{MeV}$ の陽子フラックスの日変化を示す。シールドが厚い場合は電子に加え、陽子に影響を及ぼしていることがわかる。

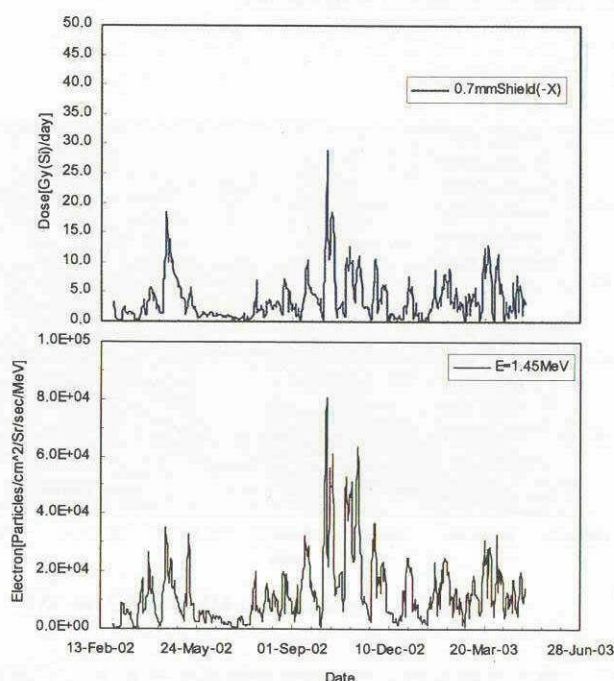


Fig.3-3 Total dose change per day versus date for 0.7mm shield in -X direction and electron flux with average energy at 1.45 MeV from SDOM.

各実験機器内に配置された DOS-S から得られたデータを解析した。Fig.3-5 に各実験機器内の最大と最小のトータルドーズについて示す。各コンポーネントの構体内部のトータルドーズは約 40Gy(Si) から約 400Gy(Si) の範囲で、ほとんどの機器のトータルドーズは約 80Gy(Si) 以下であった。局所的なシールド施した実験機器についても、その効果はほとんどなかった。これはシールドがある厚み以上 (約 10mm) はトータルドーズが

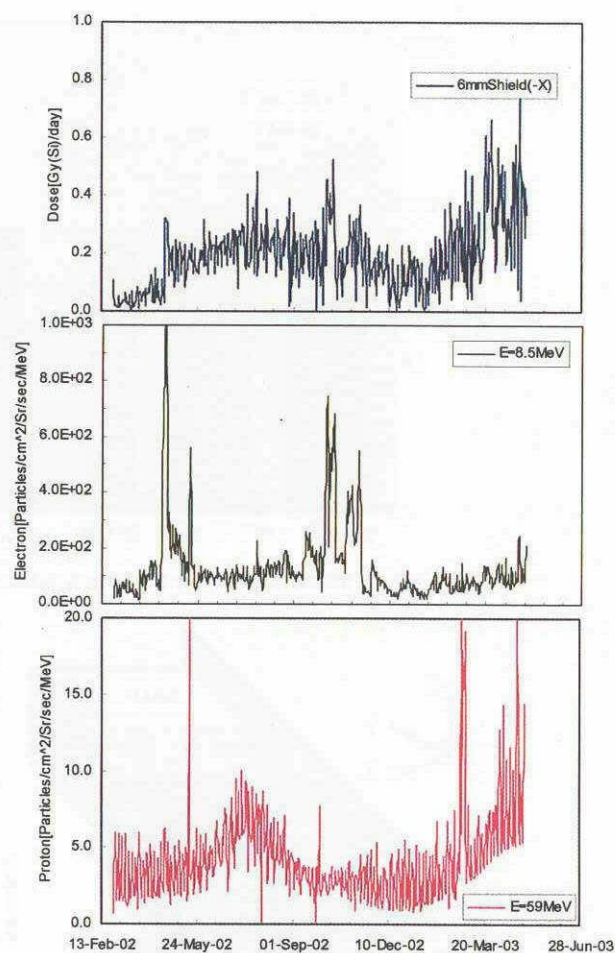


Fig.3-4 Total dose change per day versus date for 6mm shield in -X direction and proton flux with average energy at 59 MeV and electron flux with energy at 8.5 MeV from SDOM.

ほぼ一定となる予測と一致する。

半導体レコーダ実験装置 (SSR) には 14 個の DOS-S が搭載されている。SSR は -X パネルに配置され、スタックメモリモジュールが 6 個と FPGA 等がマウントしているメモリスライス基板 2 つ (MEMS1、MEMS2) から構成されており、それらは -X パネルのベースプレートに対し、直角に +Z 方向に向けて配置されている。Fig. 3-6 に SSR の構造と SSR が配置されている周りのコンポーネントについて示す。MEMS1 は +Z 方向は MEMS2、-Z 方向は HIT/MAM によってシールドされている。また MEMS2 は Z 方向から入射する放射線から影響を調べるために 2 つの厚みの異なるシャース厚 (1mm と 0.5mm) を有している。MEMS1、MEMS2 各々に 7 個ずつの DOS-S が配置されている [4]。

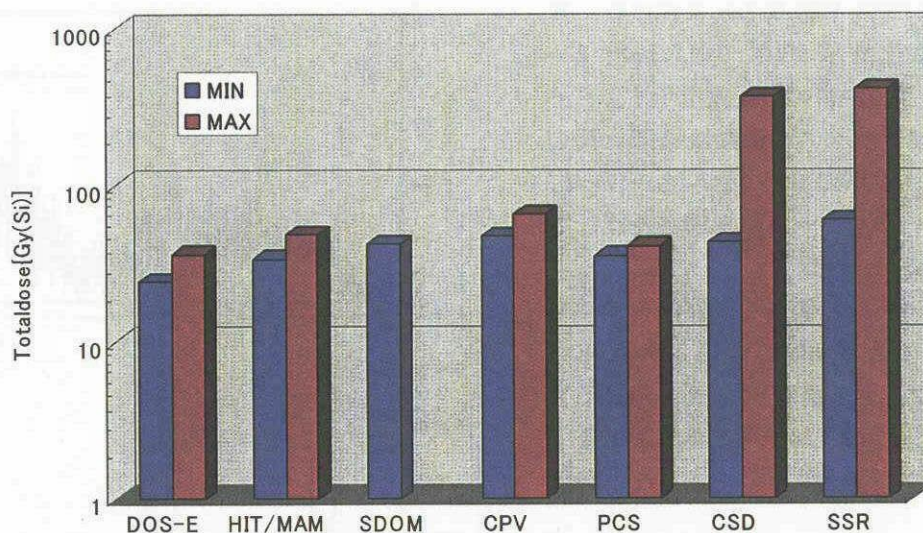


Fig.3-5 Maximum and minimum total dose in the experimental components.

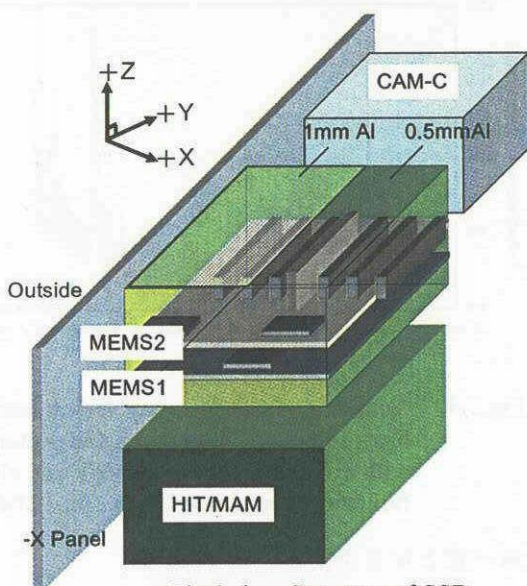


Fig.3-6 Structure of SSR

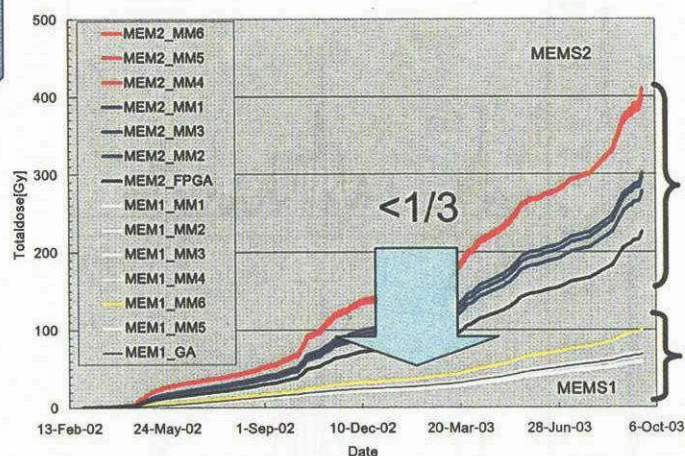


Fig.3-7 Total dose in MEMS1&2 of SSR

Fig. 3-7 に SSR の内部位置によるトータルドーズの違いを時系列で示す。MEMS1 内のトータルドーズはほぼ同じで、約 70~100Gy(Si)であった。一方 MEMS2 内のトータルドーズはシャシ厚 0.5mm で遮蔽された部分は約 400Gy(Si)、1mm で遮蔽された部分は約 300Gy のレベルであった。MEMS2 内においては +Z 方向側のシャシ厚の違いがシールド効果の違いとなって現れている。シールド効果の影響という点では、MEMS2 の基板がシールドになって MEMS1 のトータルドーズを MEMS2 のレベルの約 1/3 にしたと考えることができる。

4. 検討・考察

計算モデルによるトータルドーズ予測と実測

値の比較を行った。宇宙放射線モデルとして捕捉陽子モデル AP8, 捕捉電子モデル AE8、太陽陽子モデル JPL1991 及び遮蔽計算モデル SHIELDOSE-2 を使用した。JPL1991 の信頼度は 95%とし、ターゲットの形状は半球、材質は Si とした。DOS-S 自身の厚みである 1mm を加えて計算した。計算は 1 ヶ月毎に更新した軌道 6 要素データを用い（その間軌道は不変と仮定）1 ヶ月間毎に計算し、合算した。Fig. 4-1 に DOS-SSM2 (-X 方向) で得られた実測値とモデル予測値との比較を示す。シールド厚 1.7mm (DOS-S 自身のシールド 1mm を加えた) における実測値はモデル予測値の約 40%であった。シールド厚 4mm (DOS-S 自身のシールド 1mm を加えた) の場合、約 1 年間はモデル予測値

の約 60%であったが、最終的にほぼ同じ一致した。

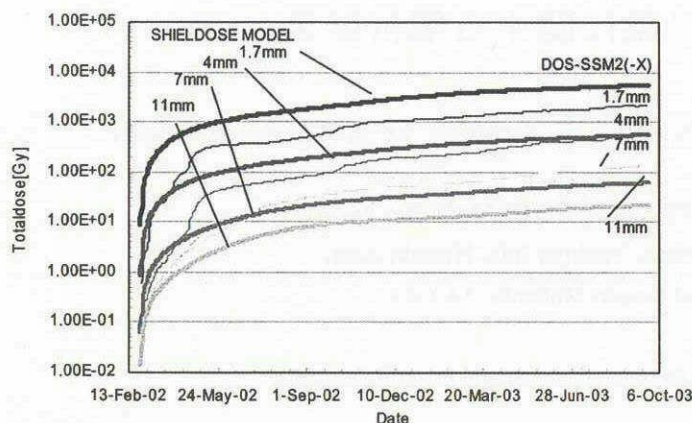


Fig.4-1 Comparison between total dose profile and SHIELDOSE-2 model calculation

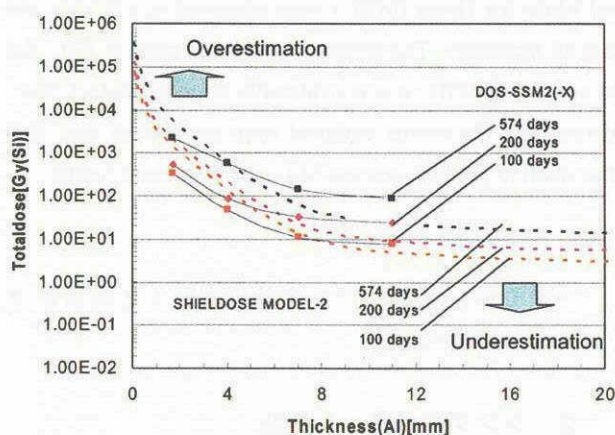


Fig.4-2 Dose-depth curve from the flight data and SHIELDOSE-2 model calculation

シールド厚 7, 11mm (DOS-S 自身のシールド 1mm を加えた) における実測値はモデル予測値の約 3 ～4 倍であった。Fig.4-2 にトータルドーズとシールド厚の関係 (Dose-Depth Curve) を 100 日間、200 日間及び全データ取得期間である 574 日間の実測値及びモデル予測値について示す。データ取得期間によって評価するシールド厚がシフトするが、全データ取得期間においてモデル予測値は実測値と比較するとより薄いシールド厚 (2mm 程度) では過大評価、厚いシールド厚 (6mm 以上) では過小評価であることがわかった。シールド設計上重要なシールド厚 4mm 付近ではほぼ一致している。また厚いシールド厚における過小評価は、トータルドーズが薄いシールド厚に比べ桁以上少ないため、遮蔽設計上問題は少ない。

この相違の理由の一つは実際のあるエネルギー

レベルの電子・陽子のフルエンスが、モデルのフルエンスと異なることが考えられる。MDS-1 で得られた電子フラックスについてはモデルと比較すると 4MeV 以下は少なく、一方 5MeV 以上は多いこと、陽子フラックスについても 20MeV 以下は少なく、30MeV 以上は多いことが解析されている [5]。この結果が実測値とモデル予測結果との食い違いを引き起こしていると考えられる。

5. まとめ

DOS で計測された 574 日間のデータについて解析した。トータルドーズが電子及び陽子の挙動に影響されるフライトデータが得られたと共に、搭載位置及び基板によるシールド効果の影響に関するデータが得られた。また遮蔽計算モデルと取得データとの比較をおこない、モデルの精度を明らかにすることができた。今後引き続き DOS の解析を進めることで遮蔽計算モデルの高精度化を行う。

6. 参考文献

- [1] 松本晴久, 五家建夫, 越石秀樹, 木本雄吾, "MDS-1 搭載用宇宙環境計測装置", 第 43 回宇宙科学技術連合講演会アブストラクト集, pp73
- [2] 木本雄吾, 越石英樹, 松本晴久, 劉洪, 五家建夫, "つばさ搭載積算吸収線量計によるトータルドーズ効果初期解析結果", 第 46 回宇宙科学技術連合講演会
- [3] Y. Kimoto, H. Koshiishi, H. Matsumoto, T. Goka, "Total dose orbital data by dosimeter onboard tsubasa (MDS-1) satellite," IEEE Trans. Nucl. Sci. vol. 50, no. 6, Dec. 2003 (in print)
- [4] 市川愉, 笹田武志, 白倉政志, 山川史郎, 高田昇, 豊田正則, 鈴木直志, "つばさ搭載半導体レコーダ装置 (SSR)", (つばさ: MDS-1) 実験成果報告書 (2003 年 5 月), 3-1～9
- [5] 松本晴久, 越石英樹, 木本雄吾, 五家建夫, 劉洪, "つばさ搭載宇宙環境計測装置でわかったこと", (つばさ: MDS-1) 実験成果報告書 (2003 年 5 月), 5-1～14