

放射線環境観測結果と新放射線設計基準への提案

Radiation environment observation results and a proposal for new radiation design standard

松本 晴久、越石 英樹、五家 建夫 (宇宙航空研究開発機構)

Haruhisa Matsumoto, Hideki Koshiishi, Tateo Goka (JAXA)

Key Words: MDS-1, Energetic particles, Radiation belts

Abstract

Space radiation environment has become a primary consideration in designing a modern spacecraft and in mitigating the risk factors for astronauts. Modern electronic devices and optical sensors are becoming more sensitive to high energy particle environments.

This paper addresses present state and problem of the radiation environment model, and comparison between MDS-1 observation data and predicted value. Finally, a new radiation design standard handbook is reported.

1. はじめに

衛星の出現 (1957 年) と集積回路 (IC) の出現 (1965 年) は、ほぼ同時期であり、宇宙開発の発展は、半導体素子の発展と密接な関係にある。宇宙開発のさらなる発展のためには、宇宙用部品に対して高性能・小型・早期入手等でメリットのある民生部品をいかに活用していくかが重要である。但し、これらの部品は、放射線に対する感受性が高く、光デバイスの陽子による変異損傷劣化、マルチビットエラー、中性子によるシングルイベント、さらには、シングルイベント及びトータルドーズの複合効果など新たに考慮しなければならない点が多い。従って、地上での評価試験が重要となり、放射線環境予測の精度向上がますます重要となってきている。

本報告では、放射線環境モデルとその問題点、さらには予測値と MDS-1 の観測結果の比較、最後に新放射線設計基準書改定の取り組みについて報告する。

2. 放射線

2.1 放射線ソース

放射線のソースとしては、地球磁場に捉えられた「放射線帯粒子」、地球外から飛来する「銀河宇宙線」及び「太陽粒子」の 3 つに分類できる。

これらの環境による影響と一般に使用されている予測モデルを表 1 に示す。

Table 1. Radiation effects and models

Radiation Source	Models	Effects
Trapped Particles	AE8-MIN, MAX AP8-MIN, MAX	TID, NIEL, SEEs
Galactic Cosmic Rays	CREME96	SEEs
Solar Flare Protons & Heavy Ions	JPL91 CREME96	TID, NIEL, SEEs

TID: Total Ionizing Dose, NEIL: Non-Ionizing Energy Loss, SEEs: Single Event Effects

2.2 BL 座標

放射線帯粒子は、地球の磁力線に沿って運動しているので、地磁気の座標で記述するのがよく、Mellwein が考案した BL 座標系が使用されている。

放射線粒子の捕捉軌道 (今後、磁気シエルと記述) を指定するのに、地球磁場をダイポール磁場で置き換えた各磁力線の L (磁気赤道距離) を R_e (地球半径、約 6400km) の倍数で表す。捕捉軌道 (L の磁気シエル) 上の位置をその場の地球磁気の大さき (磁束密度) B を、同じ磁気シエルの磁気赤道上の磁束密度 B_0 で除した B/B_0 で示す。図 1 に BL 座標系について示す。

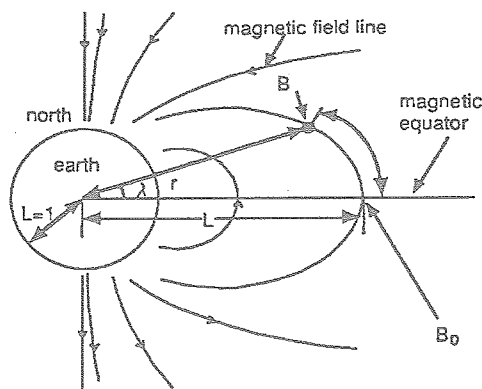


Fig.1 McIlwain's (B, L) coordinate system

3. 環境モデル

3.1 放射線帯モデル

3.1.1 AE8 モデル

AE8 は、0.04MeV から 7MeV 電子帯の環境を予測するモデルである。モデルは、1958 年から 1978 年にかけて衛星で取得されたデータを用いて作成した。粒子 Flux を磁場の強さの比 (B/B_0) と L 値で定義している。太陽活動(極大期、極小期)の選択、軌道及び運用期間を入力することで環境を予測することができる。Flux は、太陽極小期よりも太陽極大期の方が高い。

本モデルの問題点としては、磁気嵐や磁場の変動による放射線変動が反映されていない、太陽活動サイクルに対する粒子変動が、実際と食い違っている、粒子の方向分布(ピッチ角分布)を考慮せずに、全方向均一に入射しているなどが挙げられる。また、本モデルは、放射線による劣化を目的として開発されたこともあり、帯電環境に影響を与える低エネルギー電子の評価には使用できない。

3.1.2 AP8 モデル

AP8 は、0.1MeV から 400MeV 陽子帯の環境を予測するモデルである。モデルを作成するために使用したデータ、モデルの構造、計算方法等は、AE8 と同じである。Flux は、太陽極大期よりも太陽極小期の方が高い。

本モデルの問題点としては、太陽風と地球磁場との強い衝撃作用等の放射線変動が反映されていない、粒子の方向分布(ピッチ角分布)を考慮せずに、全

方向均一に入射している、低高度の精度が低い等の問題がある。

3.1.3 CREME96 モデル

CREME96 は、銀河宇宙線環境(原子番号が、1 から 92、エネルギー範囲が、10MeV/nuc から 100GeV/nuc)および太陽フレアによる陽子フラックス、さらには、これらの環境で引き起こされるシングルイベント発生率を予測するモデルである。モデルを作成するために 12 年間の IMP8 衛星及び SAMPEX 衛星で収集したデータが用いられた。

本モデルの問題点としては、シールドの種類と形状が限定されている。磁場による曲がりにくさ(粒子の硬さ: Magnetic rigidity)の精度が十分でない点が挙げられる。

3.1.4 JPL91 モデル

JPL91 は、太陽フレアによる陽子のピーク Flux を予測するモデルである。1963 年から 1991 年にかけて IMP 衛星及び OGO 衛星で取得したデータを用いている。観測結果から太陽フレアによる陽子 Flux の最大値を決定している。軌道、運用期間及び信頼度で環境を予測する。

本モデルの問題点としては、磁気カットオフの評価機能がない。また、太陽活動極小期の評価ができない、信頼度の設定は、使用するユーザが決定しなければならない点が挙げられる。

4. MDS-1 の観測結果

MDS-1 に搭載した宇宙環境計測装置は、放射線吸収線量モニタ、重イオン観測装置、磁力計及び積算吸収線量計の 4 種類からなる^{2),3)}。本章では、MDS-1 の放射線吸収線量モニタ及び重イオン観測装置の観測値と環境予測モデル予測値の比較を行う。

4.1 装置の概要

4.1.1 放射線吸収線量モニタ

放射線吸収線量モニタ(SDOM: Standard DOse Monitor)は、宇宙放射線粒子のうち、主に質量の軽い粒子(電子、陽子、 α 粒子)のエネルギースペクトルを計測する。センサは、3枚の半導体検出器(SSD: Solid State Detector)、プラスチックシンチレータ(放射線が通過した際、光を発生する物質)、アンチシンチレータ及び4個の光電子増倍管(光を増幅して電気パルスに変換する装置)で構成されている。エネル

ギーの低い宇宙放射線粒子は、半導体検出器で検出する。半導体検出器では、粒子が入射したことにより検出器内部で発生する電荷量からエネルギーを計測する。エネルギーの高い粒子は、半導体検出器を突き抜けてしまうため、後方のシンチレータで検出する。シンチレータ内での発光量は、エネルギー量に比例する。このため光電子増倍管で光から電気信号に変換しエネルギーを計測する。各入射粒子及びエネルギーにより半導体検出器、シンチレータで発生するパルス波高値が異なるため、これらの組合せで粒子弁別を行う。シンチレータは半導体検出器に比べエネルギー分解能は良くないが、高エネルギー電子を計測できるために用いた。SDOMの主要諸元を表2に示す。また、センサの断面図及びSDOMの外観をそれぞれ図2及び図3に示す。詳細は、参考文献(3)による。

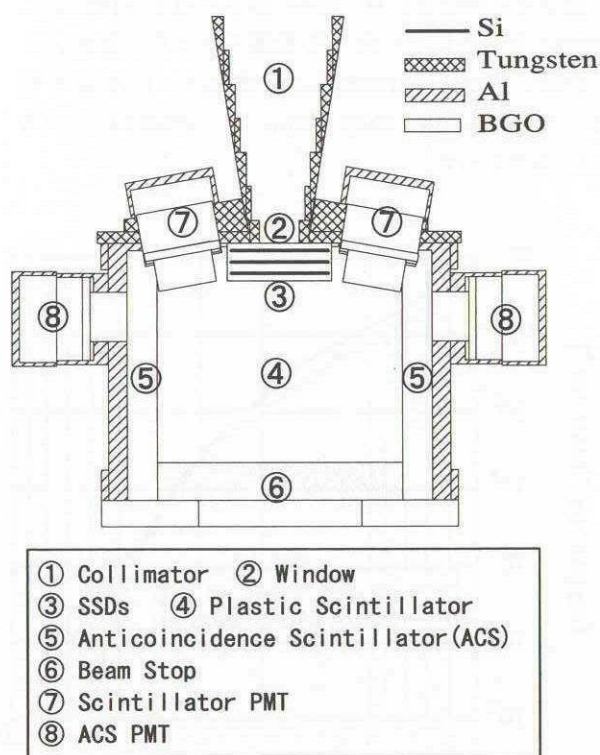


Fig.2. Cross-sectional view of SDOM.

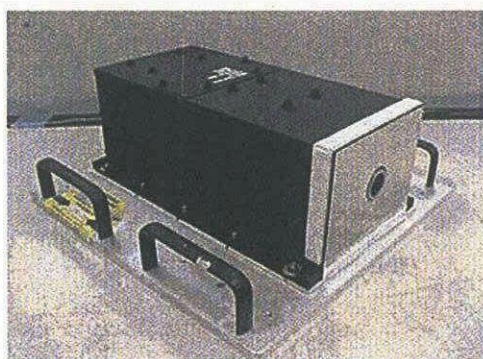


Fig. 3. Photograph of SDOM.

Table 2. Main characteristic of SDOM

Energy Range	Electrons 0.5~50MeV Protons 0.9~250MeV alphas 6.7~270MeV
Sampling Time	2sec/8sec
Dimension	330×186×121mm (LxWxH)
Weight	9kg

4.1.2 重イオン観測装置

重イオン観測装置(HIT: Heavy Ion Telescope)は、宇宙放射線粒子のうち、質量の重い粒子(ヘリウムから鉄までの重イオン)の核種、エネルギー及び入射方向を計測する。HITは、センサ部と回路部に大別でき、センサ部は、2枚の位置検出器(PSD: Position Sensitive Detector:宇宙放射線粒子が通過した位置が判別できる半導体検出器)、16枚のシリコン半導体検出器(SSD: Solid State Detector)で構成されている。PSD1は、有感領域が62mm×62mmで0.2mm厚であり、PSD2は、同じく有感領域が62mm×62mmで0.4mm厚である。また、SSD1~6は、直径85mmの円形の有感領域で0.42mm厚である。装置は、0.2mm厚アルミの窓で光シールドを施してある。また、重イオン観測装置は、底部に民生用64Mbit DRAM2個を供試体とするメモリ誤動作モニタ(SUM: Single event Upset Monitor)を配置している。供試体は、2個で55/AA(HEX)データの書き込み/読み出しを繰り返し行い、データの整合性の有無によりシングルのイベント現象を計測する。HIT/SUMの主要諸元、HITセンサ部の断面図を表3及び図4に示す。

重イオンの粒子弁別は、 ΔE - E 法を用いて行う。広範囲の荷電粒子に対して飛程 R とエネルギー E はべき乗則、

$$R = k \left(\frac{M}{Z^2} \right) \left(\frac{E}{M} \right)^\alpha \quad (1)$$

で近似的に表せる。ここで、 M と Z は粒子の質量と電荷、 E は粒子のエネルギー、 k と α は定数である。厚さ L の検出器内部で損失するエネルギーを ΔE とし、残りの検出器で停止する粒子の検出器内での損失エネルギーを E' とすると、厚さ L の検出器から残りの検出器までの飛跡長 $R' = R - L$ は、

$$R' = k \left(\frac{M}{Z^2} \right) \left(\frac{E'}{M} \right)^\alpha \quad (2)$$

と表される。(1)式及び(2)式から

$$Z^2 M^{\alpha-1} = \frac{k}{L} (E^\alpha - E'^\alpha) \quad (3)$$

が成立する。 M はおおよそ $2Z$ であるから Z は、

$$Z \approx \left[\frac{k}{2^{\alpha-1} L} (E^\alpha - E'^\alpha) \right]^{\frac{1}{\alpha+1}} \quad (4)$$

と表せる。 Z が決定されれば M は、

$$M = \left[\frac{k}{Z^2 L} (E^\alpha - E'^\alpha) \right]^{\frac{1}{\alpha-1}} \quad (5)$$

として求めることができる。

Table 3. Main characteristic of HIT/SUM

Measurement feature	HIT	Li 24~40MeV/nuc C 42~69MeV/nuc O 45~83MeV/nuc Si 62~114MeV/nuc Fe 84~155MeV/nuc
	SUM	Single event upset rate Single event latch up rate Hard error rate Soft error address
Field-of-view	HIT	90° x 90°
Time resolution	HIT	122 μ sec
Sampling time	SUM	64sec
Dimension		414×574×230mm
Weight		27.7kg
Power consumption		38.8W

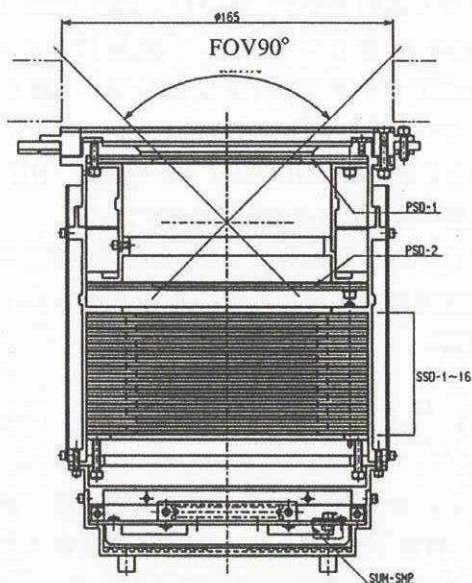


Fig. 4. Cross-sectional view of HIT-S.

4.2 軽粒子フラックス

4.2.1 平均スペクトルの比較

NASAの放射線帯モデル(電子はAE-8MAXモデル、陽子はAP-8MAXモデル)とMDS-1の実測値の平均値との比較結果を図5、図6に示す。

図から分かるとおり、2MeV以下の電子Fluxは、AE8MAXモデルに比べ約1/3程度であった。20MeV以下の陽子Fluxは、AP8MAXに比べ約1/5~1/10以下であった。20MeV以上の陽子Fluxは、AP8MAXに比べ5~10倍であった。

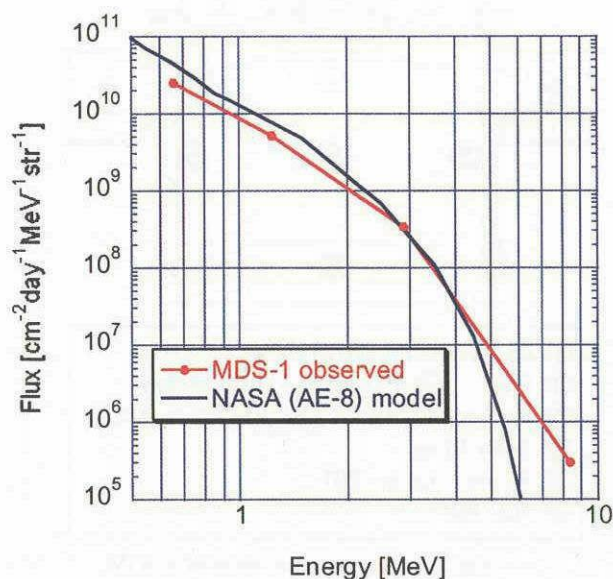


Fig.5. Electron spectra averaged by TUBASA (MDS-1)

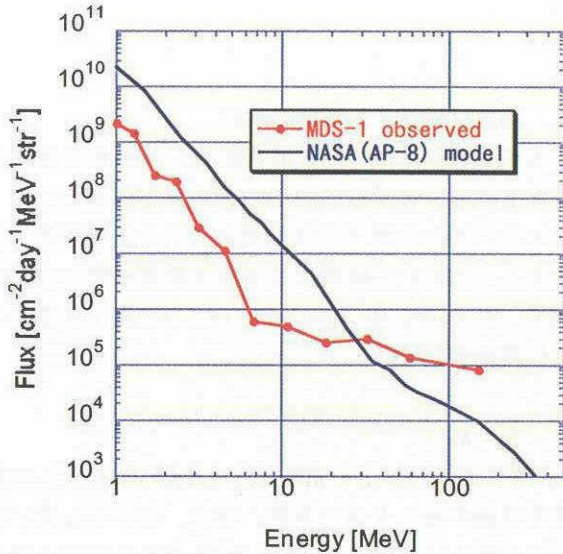


Fig. 6. Proton spectra averaged by Tsubasa (MDS-1)

4.2.2 粒子分布

磁気赤道における電子 Flux 分布の形と AE8MAX モデルの比較を図 7 に示す。分布の形は、ほぼ一致している。しかし、 $L=3\sim5$ の Flux (電子外帯) は、AE8MAX モデルよりわずに大きい結果となった。これらは、磁気嵐による影響と考えられる。

同様に、磁気赤道における陽子の Flux 分布の形と AE8MAX モデルの比較を図 8 に示す。形は、ほぼ一致している。しかし、全体にわたりつばさ (MDS-1) で計測された Flux は、低い結果となった。

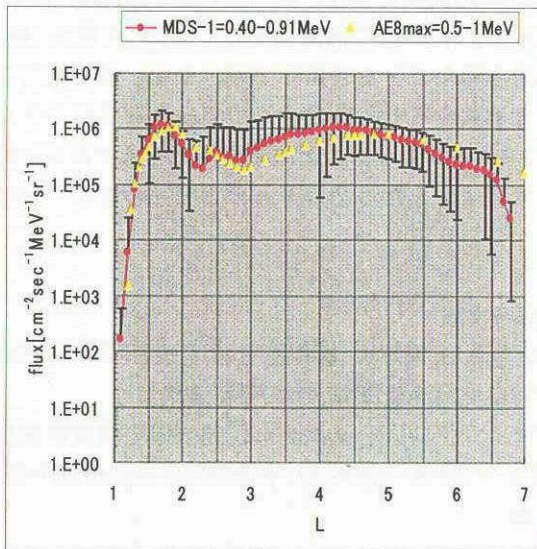


Fig. 7. Flux distribution of electrons on the magnetic equator.

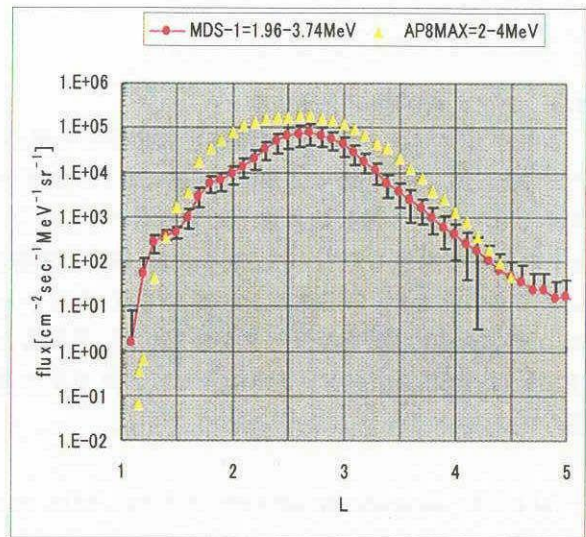


Fig. 8. Flux distribution of protons on the magnetic equator.

4.3 LET 分布

LET は、荷電粒子が物質中を進行方向に沿って短い距離を進んだ時に、物質に与えるエネルギーの量または物質密度で除した値である。

LET 分布の計測値とモデル値 (CREME96) の比較を図 9 に示す。

つばさ (MDS-1) で観測された積算 LET Flux 分布は、CREME96 モデルの予測と形が良く一致した。但し、実測の Flux 値は、モデルより若干低い結果となった。

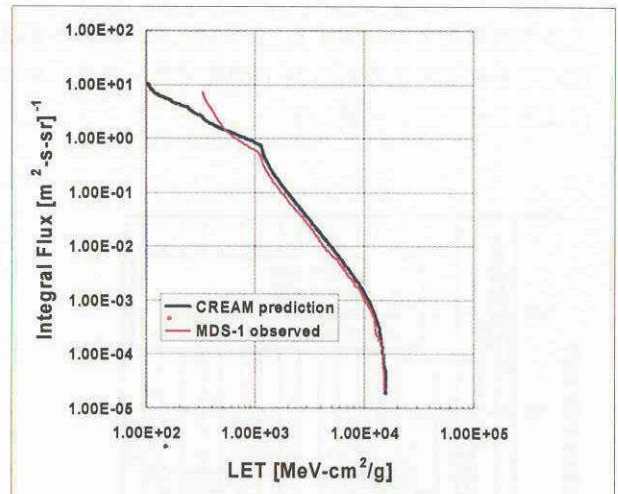


Fig.9. Comparison of observed value and prediction value (CREME96).

注： 1.5×10^4 [MeV-cm²/g] 以上の粒子は、装置の制約から弁別できていない。

4.4 シングルイベント発生率

シングルイベント発生の実測値と CREME96 を用いた予測値との比較を表 4 に示す。L 値<3.2 の領域で発生したものは、放射線帯陽子によるもの、L 値 \geq 3.2 の領域で発生したものは、重イオン(銀河宇宙線)によるものとした。実測値は、2002 年 2 月 26 日から 2003 年 1 月 18 日までのデータを使用した。実測値と予測値は、ほぼファクター 3 内に入っており実用上問題ない。

Table 4. Comparison between orbital rate and prediction rate

Particles	Device	In orbit rates /device-day	CREME96 Prediction	ratio: pred./observ.
Proton	1	16.6	13	0.78
	2	10.1	13	1.28
Heavy ion	1	10	1.9	1.9
	2	0.6	1.9	3.16

また、シングルイベント発生率の L 値分布を図 10 に示す。実測値は、L が 2.5 以下に一山(ピークは L=0.5)、それ以上の L では、L が 6.6 までシングルイベントの発生率が、徐々に減少し、6.6 以上で増加するという結果になった。2.5 以下は、モデル計算等から陽子によるものであることが分かり、モデルによる予測値とよく一致する。2.5 以上は、銀河宇宙線によるものと考えられるが、CREME モデルの重イオンによる予測とは、一致しない。

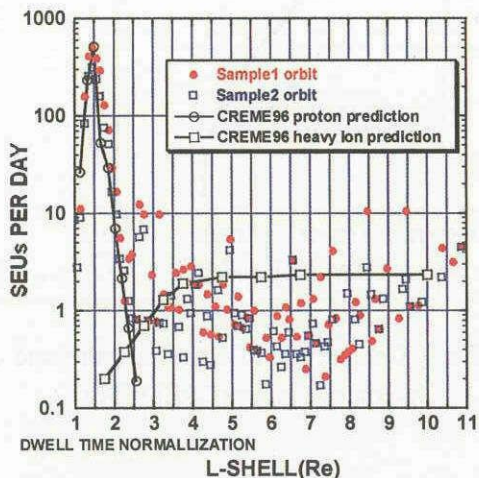


Fig. 10. SEU rates in two samples normalized for dwell time histogrammed in 0.1 L-shell bins as a function of L-shell.

5. 耐放射線設計基準書の改訂

現在、制定されている規準書は、1989 年に制定されたもので、推奨しているモデルも古いものとなっている。平成 16 年 6 月を目処に改訂を実施する予定である。さらに、同時に日本版放射線モデル(電子、陽子、He)の改訂版(JE2, JE2, JA2)を公開できるように作業を進めている。

6. まとめ

MDS-1 のデータから AE8 モデル及び AP8 モデルの精度を評価することができた。特に、モデルと食い違った 2MeV 以下の電子 Flux 及び 20MeV 以下の陽子 Flux については、平成 16 年 6 月を目処に作成する日本版放射線帯モデルに反映する。CREME96 モデルは、現在のところ大きな問題はないと判断する。JPL91 モデルは、運用期間中に大きなフレアがなく評価することができなかった。

放射線帯の変動を評価したり、放射線帯環境をモデル化する上で GT0 での放射線帯観測は、最適であった。さらに解析を進めることにより高エネルギー電子のダイナミックな変動現象を解明できるものとする。

7. 謝辞

SDOM の開発と製作に関しては、三菱電機(株)及び米国 PSI、HIT の開発に関しては、明星電気(株)に協力を得たことを感謝します。また、運用期間中大きな不具合もなくほぼ全てのデータ取得ができたのは、MDS-1 衛星システム開発関係者及び運用に携わって頂きました多くの方々のご努力の結果だと感謝致しております。

8. 参考文献

- 1) 松本晴久, 五家建夫, 越石英樹, 木本雄吾, つばさ搭載用宇宙環境計測装置, 第 43 回宇科連講演会
- 2) 宇宙インフラストラクチャ研究会宇宙環境計測技術 WG, 「つばさ(MDS-1)宇宙環境計測成果報告会」報告書
- 3) H. Matsumoto, H. Koshiishi, T. Goka, Y. Kimoto, B. D. Green, et al., Compact, Lightweight Spectrometer for Energetic Particle, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-48, No.6(2001), pp.2043-2049