

つばさの成果のまとめと提言

五家 建夫 (宇宙航空研究開発機構)

Flight Experiment Results of the Mission Demonstration Test Satellite-1 Summary & Recommendation

Tateo Goka (JAXA)

Key Words: MDS-1, Lessons Learned, Future satellite design, COTS

Abstract

An overview is given on the 6 experimental components of the Mission Demonstration Satellite-1 (MDS-1, "Tsubasa" in Japanese) mission in the space radiation environment.

Various aspects related to the radiation shielding and to the radiation-induced effects on instrumentation will also be discussed. For the benefit of future space missions, relevant lessons learned concerning space radiation environment effects, and on use of COTS (Commercially available Off The Shelf) devices and components in harsh radiation environment will finally be summarized.

1. はじめに

「つばさ」は将来宇宙機の小型・高機能・低コスト化を目的とし、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を周回させることにより、

- (1) 民生部品の宇宙適用評価技術の確立
- (2) 衛星搭載コンポーネントの事前実証
- (3) 宇宙放射線環境の計測

をミッションとする6つの実験機器を搭載して、2002年2月4日に打ち上げ、1年半以上のデータを取得し、2003年9月25日に停波した。

ここでは、各実験機器の成果のまとめ、つばさの実験のねらいと実験成果の対比、次世代衛星への成果の活用、衛星開発手法の提案、民生部品の宇宙適用の促進、先端の民生技術の早期活用と今後の活動として国内外との共同作業の予定を述べる。

2. 実証ミッションと対応実験機器の概要

2.1 民生部品の宇宙適用評価技術の確立

(1) 民生半導体部品実験装置 (CSD)

- ・メモリ素子：12個、
 - ・論理回路 (FPGA)：2個
- ##### (2) 地上用太陽電池実験装置 (TSC)
- ・シリコン(Si)系：10枚
 - ・ガリウム・砒素(GaAs)系：8枚
 - ・銅・インジウム・セレン(CIS)系：6枚

2.2 衛星搭載コンポーネントの事前実証

- (1) CPV型バッテリー実験装置 (CPV)
 - ・Ni-H₂電池の小型軽量化 (CPV化)
 - ・低コスト化技術の実証
- (2) 半導体レコーダ実験装置 (SSR)
 - ・搭載データレコーダの小型化
 - ・高速大容量化
 - ・誤り訂正技術、信頼性向上の技術実証
- (3) 並列計算機システム実験装置 (PCS)
 - ・高性能民生CPUを宇宙で使いこなすためのフォールトトレランス技術等の実証

2.3 宇宙放射線環境の計測

(1) 宇宙環境計測装置 (SEDA)

- ・軽粒子放射線環境の計測
- ・重粒子放射線環境の計測
- ・衛星各部の総被曝放射線量の計測
- ・軌道上の磁場変動の計測

3. つばさ搭載実験のねらい

- (1) 宇宙の放射線環境を精度良く計測し適切な設計余裕を確保する →宇宙環境計測
- (2) 宇宙放射線に弱い民生部品を使う手段として
 - 潜在的に放射線耐性のある民生部品を発掘し積極的に評価し活用する →民生半導体素子 (LSI) / 太陽電池
 - ある程度の部品の誤動作が発生することを前

提とした機器システム設計を行う

①誤り訂正符号技術を利用→半導体レコーダ

②フォールト・トレラント技術を利用

→並列計算機システム

→放射線総被曝線量に対し適切な遮蔽を行う

→宇宙環境計測

(3)宇宙向けの電池設計・構成について地上評価手法の妥当性確認を行う→CPV型バッテリー

4. 各実験機器の成果のまとめ

4.1 民生部品の宇宙環境下でのデータ取得

(1)銅・インジウム・セレン化合物(CIS)系の地上用太陽電池セルは極めて高い耐放射線性を持つことを宇宙実証した。将来有力な宇宙用太陽電池の候補を見出した。

(2)ICメモリのシングルイベントによる誤動作は放射線帯の内帯に集中し、その発生率は地上試験に基づく予想値と良く一致した。民生部品においても放射線の誤動作の予測精度が実証できた。誤り訂正技術、フォールト・トレラント設計によって半導体レコーダ、並列計算機システム等に高性能な民生半導体部品を衛星に採用できる見通しを得たとともに、今後の衛星用部品選択肢の大幅な拡大が期待できる。

4.2 機器の実証

静止衛星軌道10年寿命相当の間、機器が問題なく動作できる事を事前実証できた。

(1)半導体レコーダ実験装置はALOS衛星用データレコーダの事前実証ができた。

(2)並列計算機システムの軌道上実証により、高性能でかつ多重化による高信頼性が達成されている点が評価され、きぼう(JEM)のロボットアーム(RMS)のバックアップ・ドライブ・コンピュータ(BDS)に適用する方向で基本設計中である。

(3)CPV型ニッケル水素バッテリーの構成要素の実証で、ETS-8用の事前実証ができた。

4.3 宇宙環境計測

(1)従来設計に使用しているNASAモデル(電子、陽子)を改良できるデータが得られた。また

α 線環境モデルを新たに作ることができるデータが得られた。

(2)特に放射線総被曝量は予測値に比べ約1/3程度の低い値(2-3mmの薄いシールド厚)を観測しており、トータルドーズレベルの最低しきい値を変更し拡大できる見込みを得た。

5. 実証衛星ミッションと実験成果の評価の対比

5.1 実証衛星としてのミッション

(1)民生部品の評価技術の確立

民生部品の将来における宇宙機器への適用を目的として、宇宙環境下で民生用半導体部品及び地上用太陽電池のデータを取得し、民生部品の宇宙適用性評価技術を確立。

(2)コンポーネントの事前実証

将来性を有する衛星搭載用コンポーネントの小型、軽量化及び高機能化を目的とした小型化技術及び耐放射線性向上技術の事前実証。

(3)宇宙環境計測

宇宙の放射線環境等を計測し、上記(1)、(2)の部品・コンポーネントに対する影響の定量的評価、及び宇宙放射線モデルの作成。

(4)実証衛星のシステム設計

実証ミッションを確実に動作させる最小限のバス機能を持つ実証衛星を、低リスク・短期間・低コストで開発する手法の確立。

5.2 実験成果の評価のまとめ

(1)民生部品の評価技術の確立

選定した部品、宇宙環境計測装置との組み合わせ配置が妥当で、かつミッション機器設計も妥当で、貴重な基礎データが取得できた。

(2)コンポーネントの事前実証

後続機に搭載される機器の事前実証用基礎データを取得でき、さらにこの宇宙実証により新たに搭載候補へ移行したなどの成果が出ている。機器選定評価、運用データ評価もできた。

(3)宇宙環境計測

バンアレン帯の内帯、外帯の放射線強度を測定できたことで、衛星故障の原因の1つである放射線帯外帯の高エネルギー電子の変動現象解明や、新たな放射線帯モデル(太陽活動極大期モ

デル)を作成するための基礎データを取得出来た。選定軌道と測定機器の選定が妥当であった。

(4) 実証衛星のシステム設計

シンプルなシステム設計(太陽指向スピン衛星にして太陽電池パネルの駆動機構を削除)、必要最小限のバス機能、既存技術の最大限活用等により、軌道上実証実験の達成に徹した実証衛星システムとして妥当な設計手法であった。短期間・低コストの開発ができた。

6. 衛星開発手法の提案

6.1 MDS-1で実証した開発方式の特徴

- 1) 短期間の開発(3年間) = 低コスト
- 2) 簡素な衛星設計 = 衛星の頑強性、運用の簡素化
太陽指向スピン安定 = 太陽電池パドル駆動不要、ジャイロやホイール等の姿勢制御装置を不要
- 3) 既存技術、コンポーネントの最大限活用 = リスク軽減、リジッド型太陽電池パネルなどEMの不要でPFMの一段階開発
プライム契約、I/Fの簡素化
- 4) リスク管理の徹底 = リスクの認識と対応、リスク管理計画、設計確認試験、早い段階での開発者の特別点検、使用実績に応じたコンポーネントの分類とリスク低減
- 5) 確実な開発、リスク低減に新たな手法
部品の選定方針、クリティカル部品はクラス1の部品を使用、熱真空試験を機械環境試験の前に実施、余裕ある機械環境条件で設計
- 6) 低コスト開発の新たな手法
衛星と追跡管制システムの一体開発
会議を開発担当会社にて実施

6.2 今後の衛星設計への提案事項

- 機器交換を考慮したアクセス性の向上
- 機器インタフェース条件の不整合防止
- 実績ある機器においても設計変更の無いことを徹底的に確認
- 新規開発品等の設計確認試験を実施
- 扱いづらい大きなミッション機器を無くし、すべて小型化
- 湿度コントロールの工夫で通常試験環境での使用可能へ
- チームワークと情熱

7. 民生部品の宇宙適用の促進

7.1 高機能部品の選択肢拡大

- 1) 早期入手性・高性能・高集積度・小型・低電力・最先端技術・低コストの選択肢拡大ができる
- 2) 宇宙用部品の撤退で民生品でしか対応できない
- 3) 半導体データレコーダなど民生品でしか対応できない機器が増えつつある
- 4) 先端技術部品は、耐放射線対策化デバイスを開発した時点(1年から2年)で、機能・性能上約2-3世代の遅れを生じてしまうので、民生品を使いたい

7.2 民生品の宇宙適用技術の必要性

- 宇宙用部品では耐放射線対策は部品レベルでクローズできた
- 民生品では、トータルドーズ耐性が低いので、パッケージ、スポット・シールド、BOXシールド、機器内配置など、システムレベルでの対策が必要。その対策には精度の高い宇宙放射線モデルとシールドドーズモデルが必要(重量軽減のため)
- 民生品メモリ素子ではSEUの発生率が高くなりMBUが増えるので、ビット誤り訂正符号(ECC)、ハミング符号、R-S符号等の技術(MDS-1で実証済み)が必須になる
- MPUは監視機能強化(WDTの周期を早める)、並列計算機のリアルタイム・フォールトトレランス機能の技術(実証済)が必要

7.3 地上評価手法の充実

- 1) MDS-1で、地上試験と同一ロットの民生品を宇宙実証することで、地上評価技術の確立と試験法、ガイドラインを作成できた。
- 2) ロット依存性、ロット間バラつき評価が必要
- 3) SEUの陽子による地上評価試験、モデルの最適化
- 4) 微細構造ICでのSEU、MBU予測技術の向上
- 5) 低ドーズ率照射試験の重要性(リーク電流のアニール特性評価が必要)

7.4 シングルイベントへの対策の確認・見直し シングルイベント発生高度分布の宇宙用部品と民生部品の違い

- 宇宙用部品 (64kbitSRAM in ETS-6) は、外帯のみ発生→銀河宇宙線起因(図1参照)
 - 民生部品 (64MbitDRAM in MDS-1) は、内帯が2桁多い→内帯陽子起因(図2参照)
- 理由： 民生部品はシングルイベントを発生する閾値が低いので、陽子で発生
環境モデルの改良：放射線帯の低高度の陽子モデルの精度を向上させる

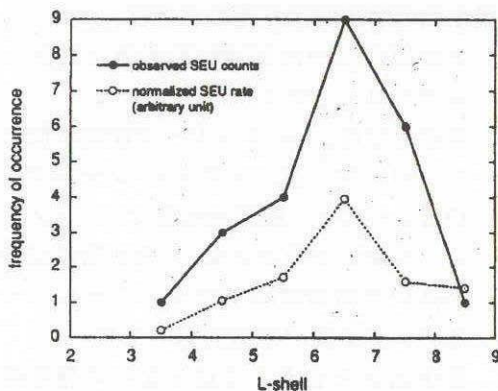


Figure 11. Spatial distribution of SEU occurrence as a function of L value

図1.宇宙用部品のSEU発生高度分布

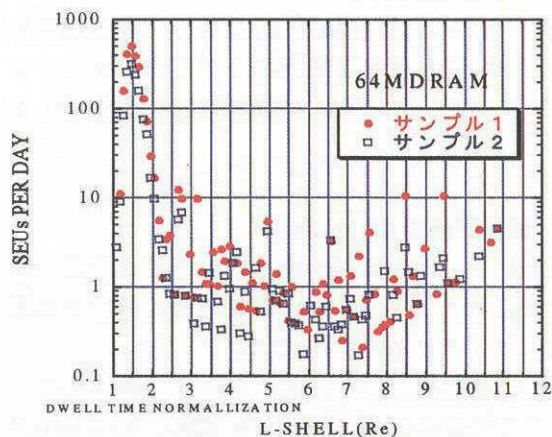


図2.民生部品のSEU発生高度分布

8. MDS-1 成果からの民生部品使用に重要な評価用の放射線帯モデルの更新

- 薄いシールド厚 (2-3 mm) でのトータルドーズ
 - 薄いシールドでNASAモデル予測の約1/3のトータルドーズ
 - 外帯電子の個数がNASAモデルの約1/3しかない
 - 放射線帯の低エネルギー電子モデルの見直し (日本版モデル)
 - 民生部品の適用範囲レベルを約3倍に拡大できる
- 厚いシールド厚 (8 mm以上) で、モデル予測より若干多い
 - 高エネルギー陽子 (> 20 MeV) の個数がNASAモデルより多い
 - トータルドーズは薄い所より約1桁以上低いので問題は少ない
 - シングルイベントではモデルの改良が必要
 - 放射線帯の陽子モデルの見直し (日本版モデル作成)

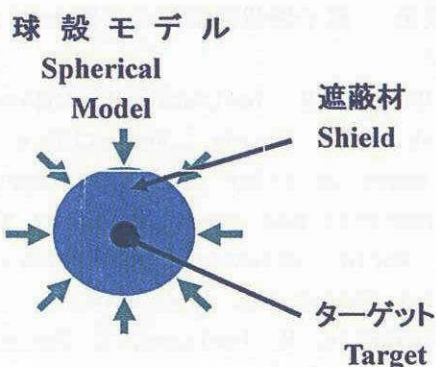
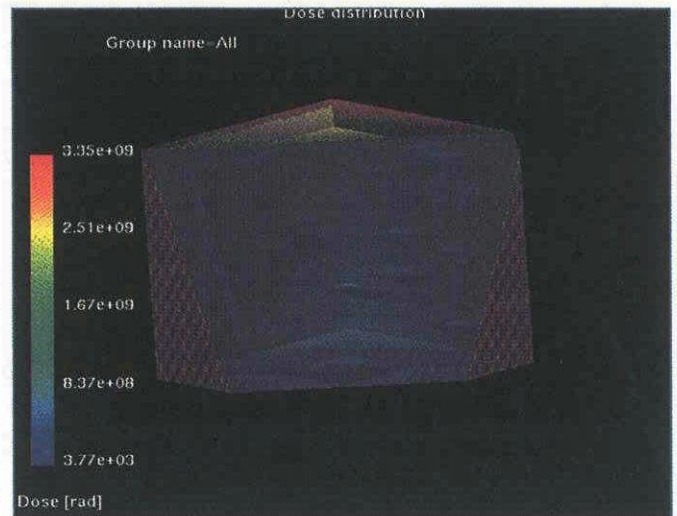
8.1 放射線モデルの構築の今後の予定

- MDS-1 観測の全データで極大期のモデルを完成する (半年)
(極小期のモデルは ETS-VI, AKEBONO データで作成済み)
- CNES の ONERA 研究所 (SAC-C 衛星データ) と MDS-1 データとデータ交換し、データ量を増やして、極大期のモデルの精度を上げる
- 放射線帯の外帯電子変動のダイナミック・モデルを CNES ONERA 研究所と共同で研究 (小原招聘研究員 (CRL) 支援)
- 最終的には極小期モデル、極大期モデル、ダイナミック・モデルを組み合わせたハイブリッド統合モデルとする (目標)
- 3次元 BOX 内シールドドーズモデルの構築 (1年以内)

9. 次世代衛星への反映 (成果の活用)

- (1) 民生半導体部品の地上評価技術のブラッシュアップ→民生部品採用のガイドラインの作成
- (2) 新たな宇宙放射線データ取得・モデルの更新
 - 「耐放射線設計基準」の更新
 - 宇宙機の環境設計基準(ISO)への貢献
 - 宇宙科学(バンアレン帯のダイナミクスの解明)への貢献
- (3) 3次元BOX内シールドモデルを構築
 - 放射線シールドモデルの高精度化
 - 民生部品適用の耐放射線レベルの閾値を適正値に下げる

従来の放射線シールド計算は、単純な球殻モデルに衛星の構造部材のアルミ等価板厚を入れたモデルで計算していた。今回の「つばさ(MDS-1)」では衛星内部の56点のトータルドーズ測定値により、衛星内部の機器ボックス内までモデル化ができる。



10. 先端的民生技術の早期活用

早いサイクルのタイムリーな実証機会の継続性確保

- 研究開発部門及び民間が開発した宇宙機器をタイムリーに宇宙で実証、プロジェクトへの適用及び市場への展開を図る。
- リードタイムが短くかつ低コストな宇宙実証手段を持つ
 - (1) ロケット上段実験システム
内作、リードタイム半年
 - (2) ピギーバック級衛星
50kg以下、内作、リードタイム1年
 - (3) 小型実証衛星
100~200kg級、インハウスでのインテグレーション・試験の実施
リードタイム1.5年

10.1 外国の機器・部品評価実証衛星の例(参考)

- ① UOSAT(1981-2000): 20年間に18個のマイクロ衛星で民生部品を低コスト目的で積極的に適用した実績(2機のみ失敗)

- ② Clementine(1994) LTO 軌道で機器・部品実証 MDS-1 の搭載実験と非常に似ている、CPV、MPU、SSR など
- ③ CRRES (1990-91) GTO 軌道で、宇宙環境計測と多くの部品実証、24 ミッションの1 つに民生部品評価 (MEP) あり
- ④ MPTB (1997-00) GTO 軌道で、32bMPU、16MDRAM、FPGA、GaAs、InP、民生リニア、民生 UVPROM、光デバイスを評価
- ⑤ STRV-1a、b、-1c、d、-2(1994-2000) GTO 軌道で、8 候補の中間に合う 6 実験装置を搭載、1 c & 1 d は打上後 2 W で失敗
- ⑥ APEX(1994-96) : 軌道高度 350 x 2500 km、軌道傾斜角 70deg、太陽電池、SEU

11. 今後の国内外の共同作業の予定

11.1 USEF 及び JAXA の部品データベース化に係る取り組み

- (a) USEF の SERVIS 及び JAXA の MDS-1 に関連する地上評価試験、フライトデータ等のデータに関して相互に実績を蓄積する。
- (b) それらのデータについて相互利用に向けた情報交換を進める。
- (c) 併せて、部品製造メーカーの積極的な協力を得るために、必要な環境の整備を図る。

11.2 CNES 及び JAXA の民生部品の宇宙適用・宇宙環境モデル作成に係わる取り組み

- (a) 民生部品の宇宙適用に係わる共通の方針・ガイドラインを設定する
- (b) 放射線に関する軌道上データの交換及び放射線帯モデルの協同作成
- (c) 部品評価試験プログラムを協同作成する

まとめ

宇宙環境 (複合環境、全方向性、低い照射レート等) そのものを完全に地上で再現できないので、宇宙実証を重ねていくことにより、環境模擬の精度を向上させていく必要がある。

宇宙環境、特に宇宙放射線による劣化や誤動作を起こしやすい民生品を宇宙機に採用していく上で必要なものは、民生品の実環境による長期間の特性の把握、地上評価試験法の検証、部品の誤動作や故障が起きてもシステムの許容するフォールトトレランス技術、フェールセーフ設計技術などを、実機に搭載する前に十分検証しておくことである。

ここに述べた「つばさ」の成果を次世代衛星へ確実に反映すると同時に、さらなる今後の民生部品の宇宙適用へ向けて

- (1) 高機能部品の選択肢拡大
- (2) 宇宙実証評価のサイクルを早める
- (3) 地上評価手法の確立

により民生部品の進歩に追従するために宇宙実証機会の継続を行いたい。

最後に、磁気赤道域の宇宙環境の放射線と磁場を高い時間/空間分解能で同時計測した衛星として「つばさ」は世界の唯一の衛星なので、バンアレン帯外帯の高エネルギー電子のダイナミックな変動現象 (多くの静止衛星障害の原因) を現在解明していることを述べておきたい。

参考文献

- 1) T. Goka, H. Matsumoto, H. Koshiishi, H. Liu, Y. Kimoto, S. Matsuda, M. Imaizumi, S. Kawakita, O. Anzawa, K. Aoyama, Y. Tanioka, S. Ichikawa, T. Sasada, and S. Yamakawa "SPACE ENVIRONMENT & EFFECT MEASUREMENTS FROM THE MDS-1 (TSUBASA) SATELLITE ", 23th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 2002-h-32p, Matsue, 2002.
- 2) 谷岡憲隆、搭載電子機器の宇宙実証-MDS-1 の成果-、電子情報通信学会全国大会, March, 2003
- 3) S. Matuda, M. Imaizumi, O. Anzawa, S. Kawakita, T. Sumida, " Radiation effects in space on solar cells developed for terrestrial use demonstrated by MDS-1, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May, 2003.
- 4) S. Kawakita, M. Imaizumi, T. Sumida, K.

Kushiya, T. Ohshima, M. Yamaguchi, S. Matsuda, S. Yoda, T. Kamiya," Super radiation tolerance of CIGS solar cells demonstrated in space by MDS-1 satellite, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May, 2003.

- 5) 松求晴久、越石秀樹、木本雄吾、五家建夫、つばさ衛星/SEDA による宇宙放射線環境観測、信学技報、SANE2003-06(2003-06), June, 2003.
- 6) 新藤浩之、池田直美、飯出芳弥、川北史郎、隅だ泰史、今泉 充、久保山智司、松田純オット、MDS-1 搭載民生用半導体部品実験層置 (CSD) 及び地上用太陽電池実験装置 (TSC) 実証実験による放射線試験手法の評価、信学技報、SANE2003-24(2003-06), June, 2003.
- 7) 桑島三郎、高木恒平、艸分宏昌、市川 愉、笹田武志、鈴木秀人、浅田 貢、MDS-1 搭載宇宙用コンポーネントの実証試験 CPV 型バッテリー・半導体レコーダ・並列計算機システム、信学技報、SANE2003-25(2003-06), June, 2003.
- 8) T. Sumita, M. Imaizumi, S. Kawakita, S. Matsuda, S. Kuwajima," Analysis of radiation effects in space for terrestrial solar cells on MDS-1, 2003 IEEE Radiation Effects Data Workshop, pp.11-16, 2003.
- 9) 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).