

中低高度軌道における宇宙放射線環境

(財) 無人宇宙実験システム研究開発機構

金井 宏、濱 一守、伊地智 幸一、秋山 雅胤

1. はじめに

財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF) は、現在 2 機の衛星の軌道上運用を行っている。1 機目は次世代型無人宇宙実験システム (USERS) であり、2 機目は宇宙環境信頼性実証システム実証衛星 1 号機 (SERVIS-1) である。これら 2 機の衛星は経済産業省の監督の下に新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて、USEF が開発し、軌道上運用をおこなっている宇宙実証衛星である。

USERS プロジェクトは、長期軌道上実験後に自立帰還する無人宇宙実験システムの技術確立、高温超電導材料製造実験及び宇宙機システムの低コスト化を目指した民生部品・民生技術を搭載した 5 種類の実験装置の軌道上実証試験を目的として、2002 年 9 月 10 日に H-A ロケットで高度約 500km、軌道傾斜角 30.4 度の円軌道に打ち上げられた。初期チェックアウト後に、高温超伝導材料実験が実施され、2003 年 5 月 30 日にその実験成果は帰還回収された。その後、約 580km まで高度を上げた後現時点まで民生部品・民生技術の宇宙実証試験が継続されている。USERS 衛星の写真を写真 1 に示す。

SERVIS プロジェクトは、我が国が得意とする半導体部品を主とした民生電子部品及び民生技術を宇宙環境下で使用するための知的基盤としてガイドライン類と民生部品データベースを構築することにより、宇宙機器の小型・高機能化、低コスト化を目指したプロジェクトであり、主要部分に民生電子部品を用いた 9 種の実験装置と民生電子部品を単体で試験する部品単体試験装置を搭載した実証衛星 1 号機は 2003 年 10 月 30 日に ROCKOT ロケットにより高度約 1,000km、軌道傾斜角 99.5 度の太陽同期軌道に打ち上げられた。初期チェックアウト後から現在まで民生部品・民生技術の宇宙実証試験を継続している。SERVIS-1 衛星の写真を写真 2 にします。

部品等が曝される宇宙放射線環境を計測するため、USERS 及び SERVIS-1 には宇宙放射線環境を計測するための環境計測装置を搭載している。USERS の環境計測装置は、粒子エネルギー spektrometa とドーズモニタから構成されている。一方、SERVIS-1 の環境計測装置は粒子エネルギー spektrometa、アップセットモニタ及びドーズモニタから成っている。これら 2 つの環境計測装置により、高度の異なる 2 つの軌道での同時的な宇宙放射線環境を計測してきた。

2. 環境計測装置

USERS 及び SERVIS-1 に搭載している環境計測装置のセンサとその特性を以下に示す。

2.1 USERS 搭載環境計測装置 (EMS)

USERS の環境計測装置は粒子エネルギー spektrometa とドーズモニタから構成されている。それらの特性を以下に示す。環境計測装置は衛星構体内に設置されている。

(1) 粒子エネルギー spektrometa

粒子エネルギー spektrometa は透過型シリコン粒子検出器 4 個と 2 種類の遮蔽材から構成されており、構造図を図 1 に示す。S1 から S4 が透過型シリコン粒子検出器で、S2

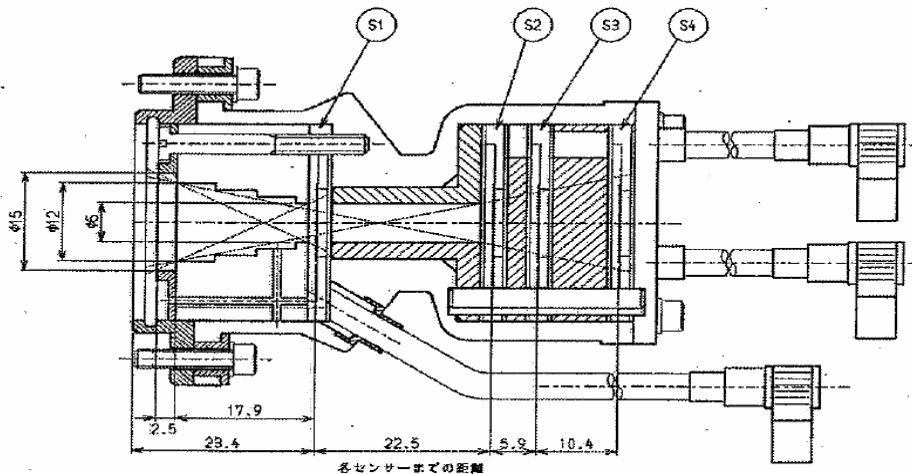


図 1 粒子エネルギー spektrometa

と S3 及び S3 と S4 の間に遮蔽材が組み込まれている。粒子エネルギー spektrometa は宇宙放射線の内、主要な成分である電子、陽子、及びアルファ粒子のそれぞれ 3 群のエネルギー spektrol を計測できる。それぞれの粒子のエネルギー計測範囲と透過型シリコン粒子検出器それぞれの幾何学的効率 (GF) を表 1 に示す。粒子エネルギー spektrometa は 3 台搭載されており、それぞれの視野方向は USERS 衛星機軸の X、Y、Z 方向を向いて取り付けられている。粒子エネルギー spektrometa の計測周期は、高レートモードの場合は 1 秒、低レートモードの場合は 4 秒である。

(2) ドーズモニタ

ドーズモニタのセンサとしては、MOS-FET である RADFET を使用している。ドーズの計測範囲は 0Gy(Si) ~ 200Gy(Si) である。ドーズモニタは衛星構体内に 1 個搭載している。計測周期は 2048 秒である。

2.2 SERVIS-1 搭載環境計測装置 (EMSS)

SERVIS-1 の環境計測装置は粒子エネルギー spektrometa、ドーズモニタ及びアップセットモニタから構成されている。それらの特性を以下に示す。これらのセンサはペイロードユニット (PLU、図 5 参照) の内部及び外部に設置されている。

表1 エネルギー計測範囲及び幾何学的効率

エネルギー群	X-軸		Y-軸		Z-軸		GF ($\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)
	E _{min}	E _{max}	E _{min}	E _{max}	E _{min}	E _{max}	
eE1	0.7	3.8	0.8	3.9	0.8	3.9	0.0228
eE2	3.8	18.2	3.9	18.3	3.9	18.3	0.0224
eE3	18.2	18.2 以上	18.3	18.3 以上	18.3	18.3 以上	0.0197
pE1	15.9	44.1	16.3	44.2	16.2	44.2	0.0228
pE2	44.1	99.4	44.2	99.5	44.2	99.5	0.0224
pE3	99.1	131.5	99.5	131.5	99.5	131.5	0.0197
E1	16.0	21.9	16.5	22.2	16.5	22.2	0.0228
E2	44.1	47.0	44.2	47.1	44.2	47.1	0.0224
E3	99.2	101.0	99.3	101.0	99.3	101.0	0.0197

(エネルギー単位: MeV)

(1) 粒子エネルギー spektrometer (LPD)

粒子エネルギー spektrometer (LPD) は2個の透過型シリコン粒子検出器と YAP シンチレータから構成されており、その構造図を図2に示す。LPDは電子(4エネルギー群)、陽子(6エネルギー群)、アルファ粒子(1エネルギー群)及びアルファ粒子より重い重粒子(1エネルギー群)が計測できる。それぞれの粒子のエネルギー計測範囲と幾何学的効率(GF)を表2に示す。LPDはPLU構体内部に設置されているが、視野方向のPLU構体を切り欠くことにより、直接宇宙放射線のエネルギー spektrometerを計測できるようにしている。その視野方向は反太陽方向を向いている。計測周期は4秒である。

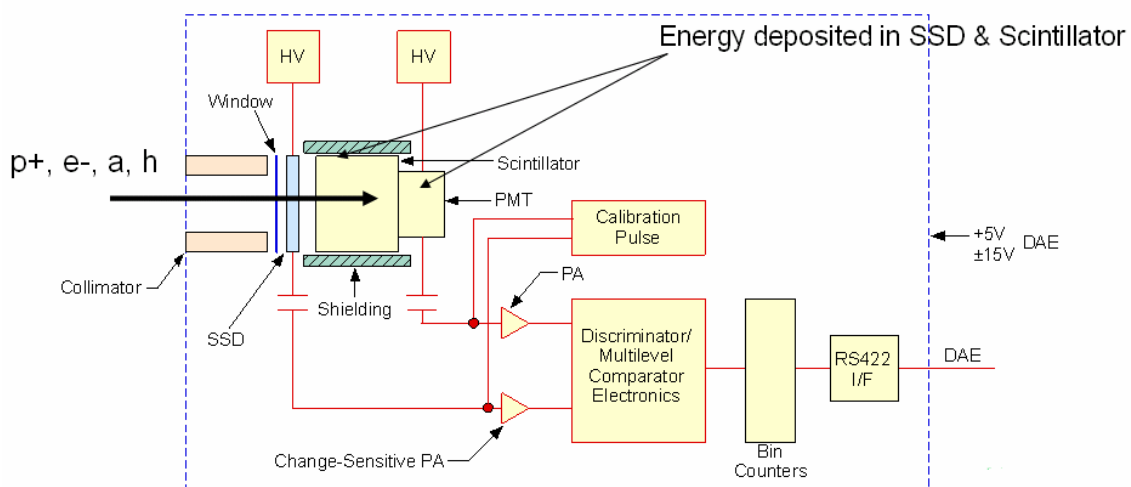


図2 粒子エネルギー spektrometer (LPD) の構造図

表2 LPD のエネルギー計測範囲及び幾何学的効率

エネルギー群	エネルギー計測範囲 (MeV)		GF (cm ² · sr)
	E _{min}	E _{max}	
E1	0.3	1.5	0.21
E2	1.7	3.4	0.17
E3	3.4	6.6	0.18
E4	6.6	10 以上	0.23
P1	1.2	12.5	0.26
P2	12.5	24.5	0.26
P3	24.5	37.0	0.26
P4	38.0	53.0	0.26
P5	53.0	96.0	0.26
P6	96.0	150.0	0.26
Alha Particle	7.0	640.0	0.26
Heavy Ion	2 MeV/nucl.	160 MeV/nucl.	0.26

(2) アップセットモニタ (USM、SEU)

アップセットモニタのセンサとして、アップセット飽和断面積と閾値 LET の値が既知である 2 種類の 4Mbit SRAM (表 3) を用いている。アップセットモニタは同一のものを PLU 構体の外部 (USM、反太陽方向) と PLU 構体内部 (SUM) に設置されている。計測周期は 32 秒である。

表3 アップセットモニタの 4Mbit SRAM の SEU 特性

センサ名	型式	重イオン SEU		陽子 SEU	
		閾値 LET (MeV/(mg/cm ²))	飽和断面積 (cm ² /bit)	閾値エネルギー (MeV)	飽和断面積 (cm ² /bit)
SRAM1	32C408BRP	3.2E+01	4.0E-11	> 5.1E+01	< 2.4E-16
SRAM2	UT7Q512	2.9E+00	6.0E-07	< 1.0E+01	1.0E-13

(3) ドーズモニタ (SDOS、DOS)

ドーズモニタのセンサとして、RADFET を用いている。センサの構造は図 3 に示すように、RADFET チップを構造材でパッケージすることにより電子平衡をとっている。

このセンサを PLU 構体内に放射線感受面を衛星基軸の X、Y、Z 軸方向を向くように各 1 個ずつ、計 3 個搭載している (DOS-1、DOS-2、DOS-3)。さらに、図 4 に示す 3 種類の厚み (6mm、3mm、0.7mm) を持つアルミニウム半球ドーム内にセンサを設置したシ

ールド付きドーズモニタを PLU 構体の内外に X 軸方向を向けて 1 組ずつ搭載している (SDOS-1: PLU 構体外部、SDOS-2: PLU 構体内部)。使用しているドーズモニタの計測範囲は $0.18\text{Gy}(\text{Si}) \sim 1.0 \times 10^3\text{Gy}(\text{Si})$ である。計測周期は 20 分である。

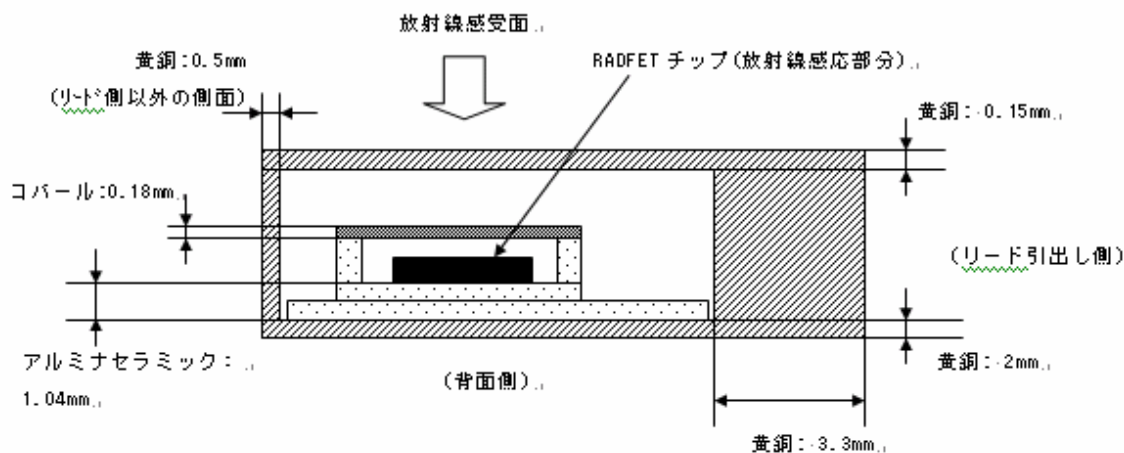


図3 ドーズモニタセンサの構造

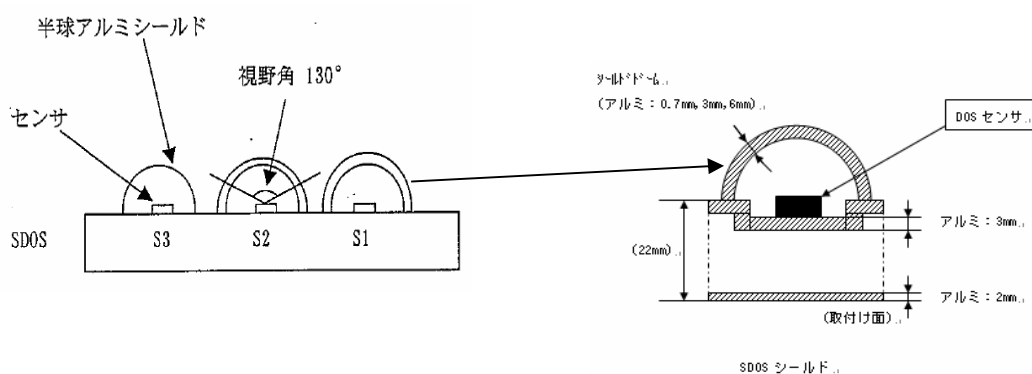


図4 シールド付きドーズモニタの構造

(4) 各センサの衛星搭載位置

環境計測装置の各センサは PLU 構体の内部及び外部に搭載されている。それらの搭載位置を図5に示す。+X 方向が常に反太陽方向を向いている。

2.3 USERS、SERVIS-1 の粒子エネルギー spektrometa の軌道上配置

USERS 及び SERVIS のそれぞれの粒子エネルギー spektrometa の視野方向を地球及び太陽との位置関係で示した図を図6及び図7に示す。

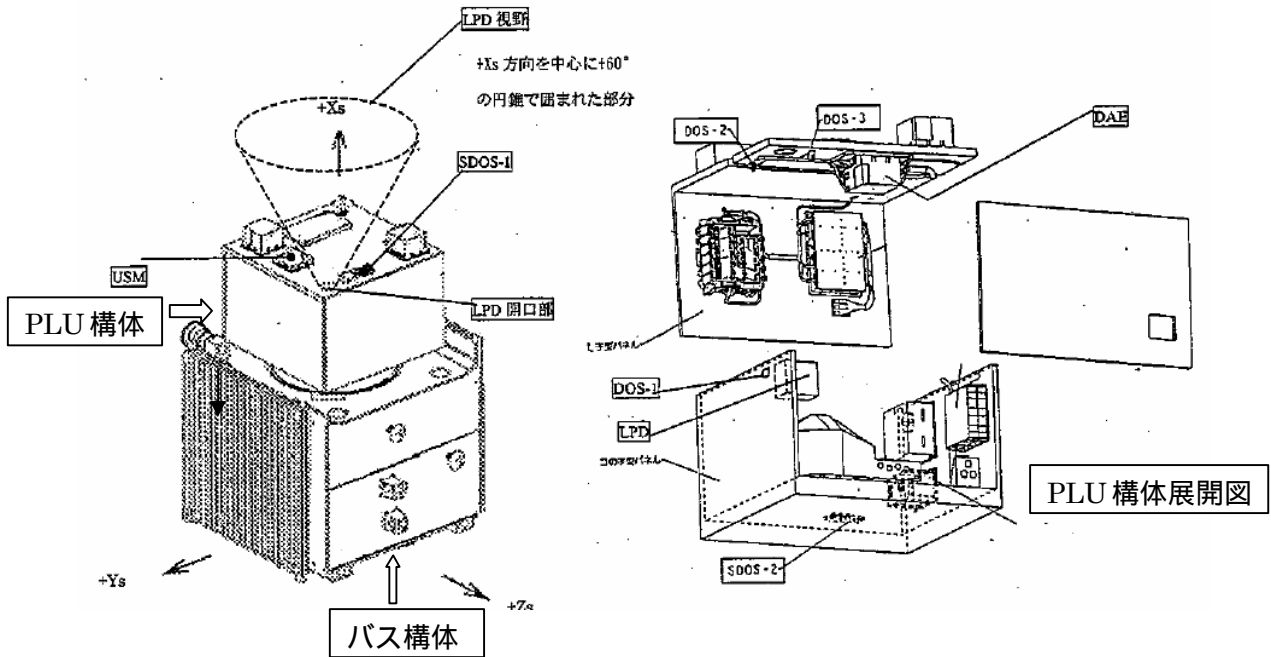


図5 SERVIS-1 の EMSS 各センサの搭載位置

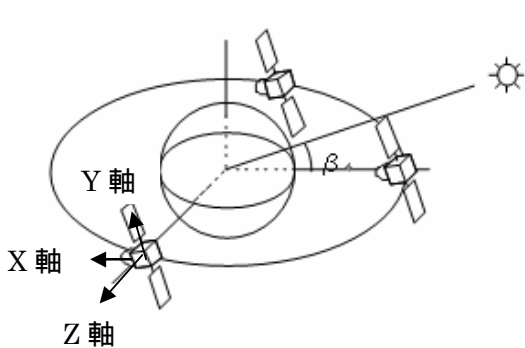


図6 USERS 粒子エネルギー spektrometer の視野方向 (矢印の方向)

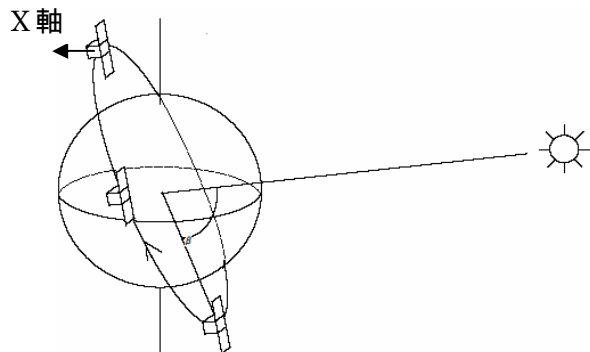


図7 SERVIS-1 粒子エネルギー spektrometer の視野方向 (矢印の方向)

3. 宇宙放射線環境の計測結果

環境計測装置による計測結果として、測定位置を表示するワールドマップ表示、測定結果の時系列分布、エネルギースペクトル及びドーズ量の形で下記に示す。

3.1 ワールドマップ表示

粒子エネルギー spektrometer で計測された各粒子の強度分布 (USERS の場合は、

3つのスペクトロメータの計測値の合計)の地球上の位置との関係で表示したワールドマップ表示を USERS について図8～図10に、SERVIS-1について図11から図14に示す。

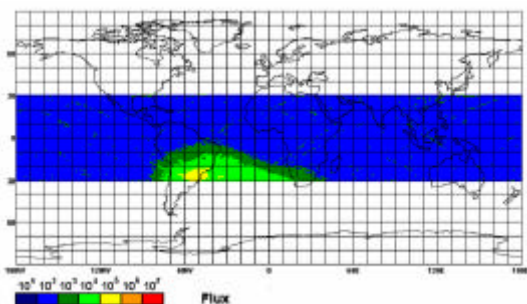


図8 電子の強度分布 (USERS)

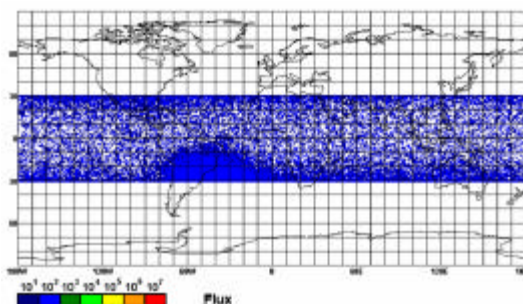


図10 アルファ粒子の強度分布 (USERS)

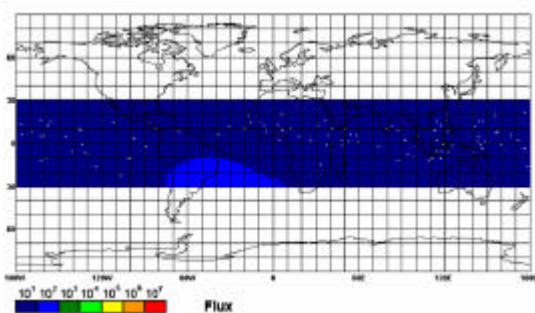


図9 陽子の強度分布 (USERS)

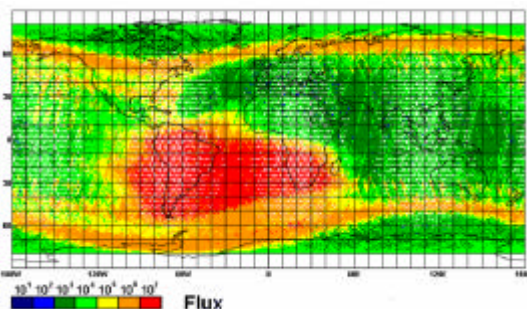


図11 電子の強度分布 (SERVIS)

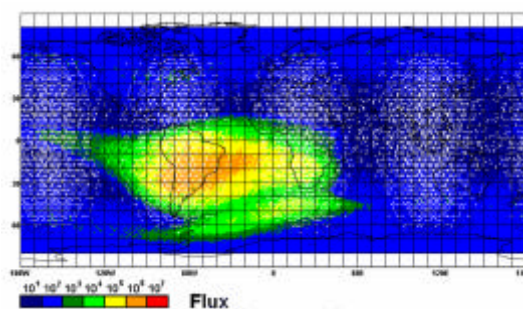


図12 陽子の強度分布 (SERVIS)

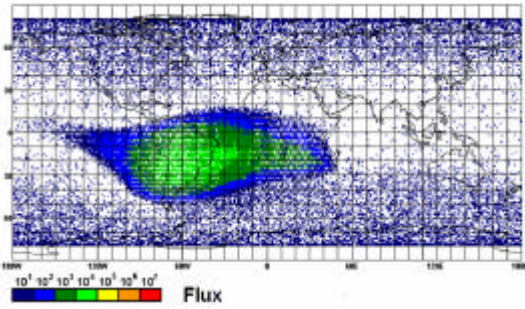


図 1 3 アルファ粒子の強度分布 (SERVIS)

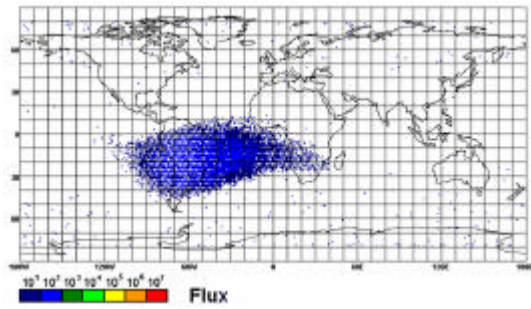


図 1 4 重粒子の強度分布 (SERVIS)

USERS の軌道傾斜角は 30.4 度であるため、ワールドマップ上の分布は ± 30.4 度の範囲に分布している。一方、SERVIS-1 は極軌道であるため、ワールドマップ全領域に分布している。USERS、SERVIS-1 の軌道高度はバンアレン帯の内帯より低いため、粒子強度分布は地球磁場が低高度まで下がっている南大西洋異常 (SAA) であるブラジル上空で強く、電子の場合は極地方で次に強くなっている。

SERVIS-1 のアップセットモニタ (USM、SUM) の内、表 3 に示すように SRAM1 はアップセットを起こす閾値 LET (重粒子の場合) や閾値エネルギー (陽子の場合) が大きいことからアップセットは発生していないため、SRAM2 の結果のワールドマップ表示を図 1 5 と図 1 6 に示す。

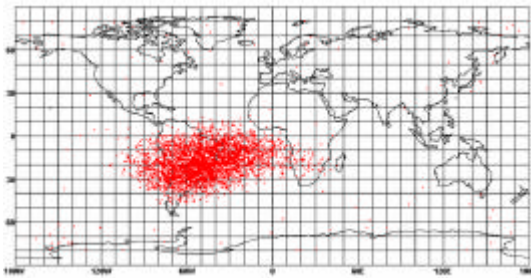


図 1 5 アップセット発生分布 (USM)

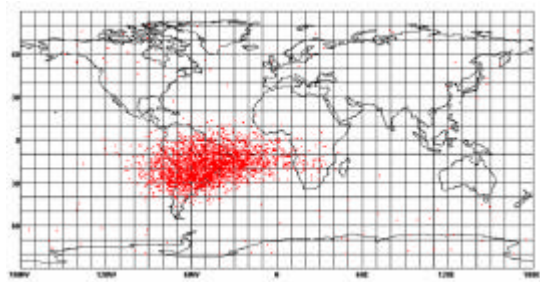


図 1 6 アップセット発生分布 (SUM)

アップセット発生分布は、粒子強度分布と同様 SAA に偏在している。USM はペイロードユニット外に、SUM はペイロードユニット内に設置されているため、SEU の方が USM より遮蔽厚が厚いことから SUM のアップセット数が少ないことがわかる。

3.2 時系列分布

粒子エネルギースペクトルとドーズモニタの測定結果の計測開始からの強度の時系列分布を下記に示す。

USERS 粒子エネルギースペクトルの各軸、各エネルギーの時系列分布を図 1 7 から図 2 5 に、SERVIS-1 の粒子エネルギースペクトルの時系列分布を図 2 6 から図 2 8 に示す。また、SERVIS-1 のドーズモニタの時系列分布を図 2 9 から図 3 1 示す。

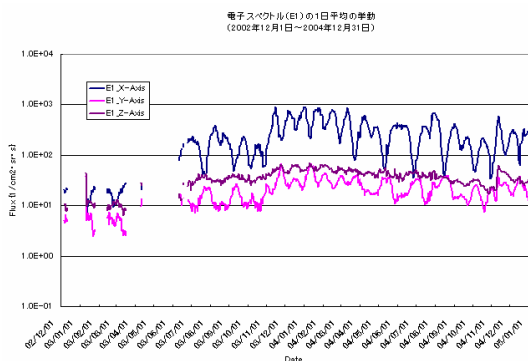


図 1 7 電子 (E1) の時系列分布 (USERS)

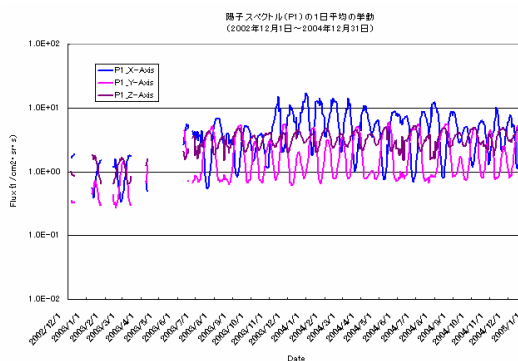


図 2 0 陽子 (P1) の時系列分布 (USERS)

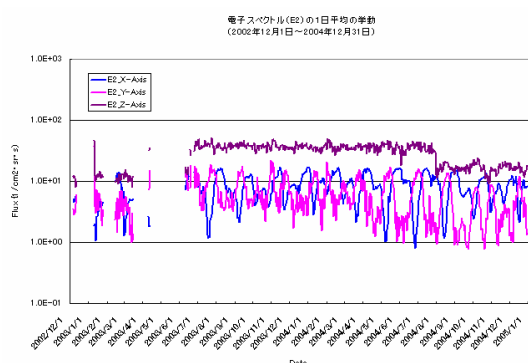


図 1 8 電子 (E2) の時系列分布 (USERS)

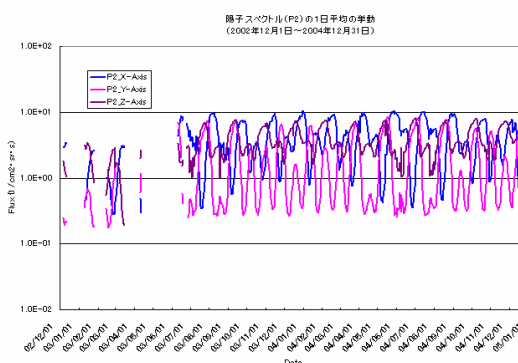


図 2 1 陽子 (P2) の時系列分布 (USERS)

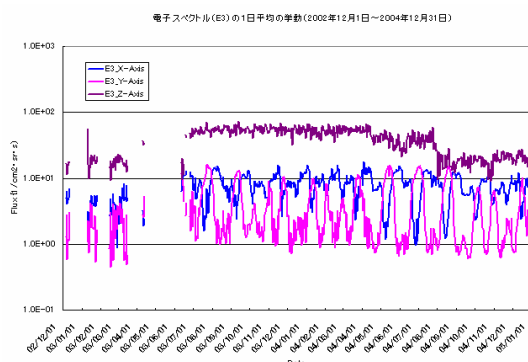


図 1 9 電子 (E3) の時系列分布 (USERS)

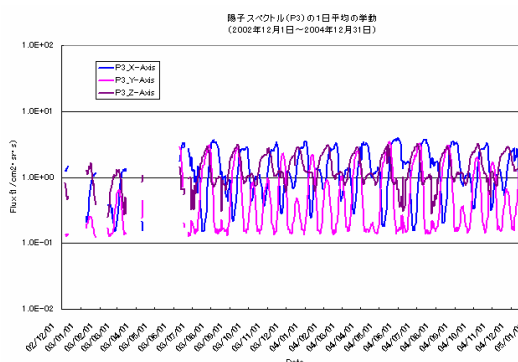


図 2 2 陽子 (P3) の時系列分布 (USERS)

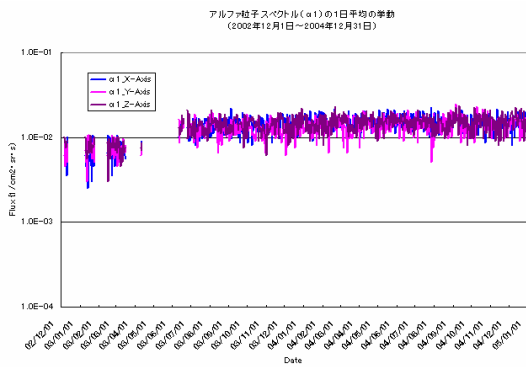


図 2 3 アルファ粒子(1)の時系列分布 (USERS)

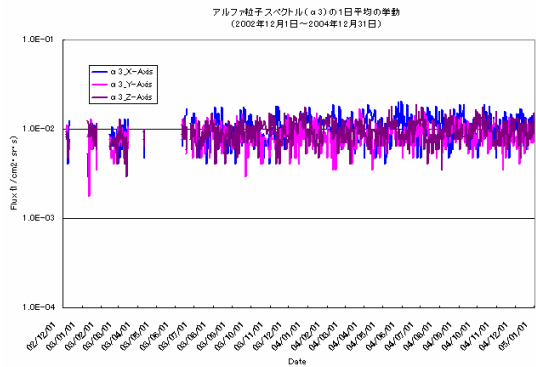


図 2 5 アルファ粒子(3)の時系列分布 (USERS)

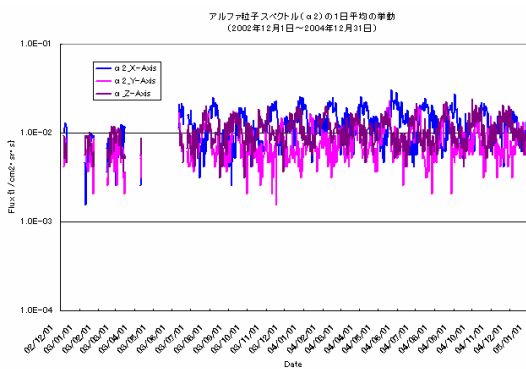


図 2 4 アルファ粒子(2)の時系列分布 (USERS)

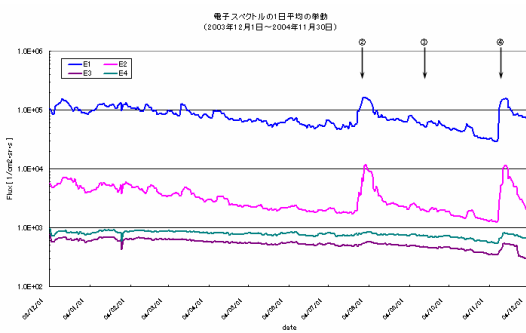


図 2 6 電子の時系列分布(SERVIS-1)

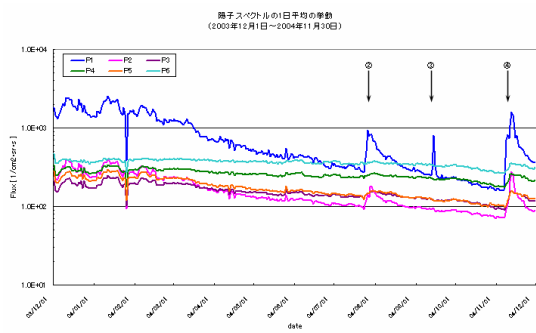


図 2 7 陽子の時系列分布(SERVIS-1)

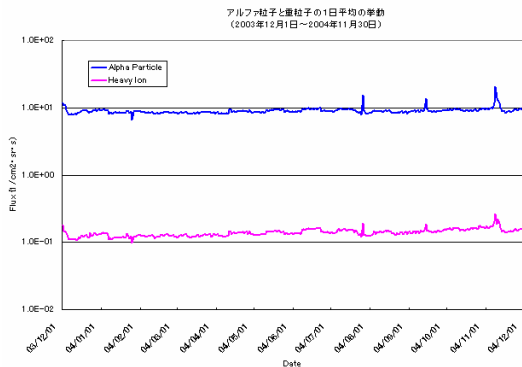


図 2 8 アルファ粒子と重粒子の時系列分布(SERVIS-1)

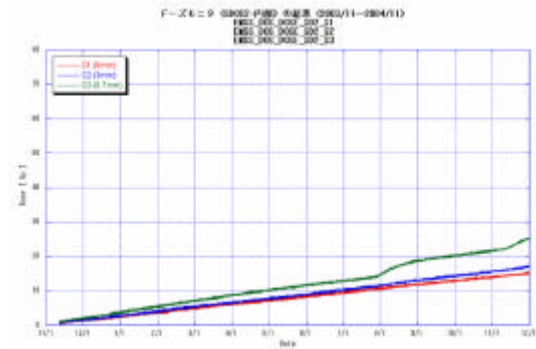


図 3 0 シールド付きドーズの時系列分布 (PLU 構体内部、SERVIS-1)

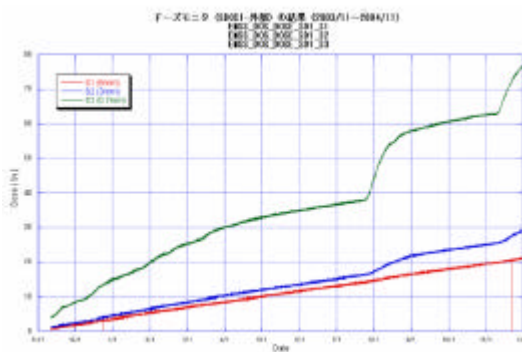


図 2 9 シールド付きドーズの時系列分布 (PLU 構体外部、SERVIS-1)

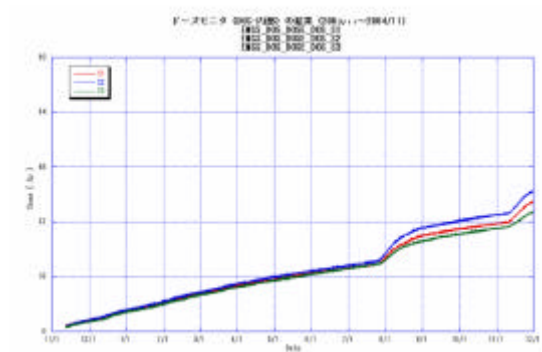


図 3 1 ドーズの時系列分布 (PLU 構体内部、SERVIS-1)

USERS 粒子強度の時系列分布で 2003 年 7 月以前における空白部分があるのは高温超電導材料製造実験及び帰還回収のため、環境計測装置は停止していたためである。また、電子の Z 軸を除く電子と陽子の時系列分布が周期的に振動していること、X 軸の分布と Y、Z 軸の分布で位相がずれている。この原因については現在調査中である。

SERVIS-1 粒子強度の時系列分布では、USERS で見られたような明確な振動現象はない。2004 年 7 月末、9 月中旬及び 11 月中旬の不連続なピークはこの時期に発生した大きな太陽フレアに起因している。この太陽フレアの影響は USERS の場合は明確には観測されていない。このことは USERS 軌道高度が低いことによるものと考えられる。SERVIS-1 ドーズの時系列分布においても、7 月末と 11 月中旬の太陽フレアの影響が現れている。9 月中旬の太陽フレアの影響が出ていないのは、ドーズに大きい影響を与える電子強度分布がこの太陽フレアの場合はほとんど変動していない(図 2 6) ことによると考えられる。また、シールド付きドーズにおいて、シールド厚が薄いほど太陽フレアの影響が大きく、厚いシールドの場合は影響が少ないかあるいは影響が現れていない。この現象は、太陽フレアに伴う電子及び陽子のフラックス強度の変動が低エネルギー成分のみである(図 2 6 ,

図 2 7) ことに起因している。

3.3 積分エネルギースペクトル

USERS 及び SERVIS-1 の粒子エネルギー spektrometa で計測された電子及び陽子の積分エネルギー spectrol を図 3 2 から図 3 5 に示す。

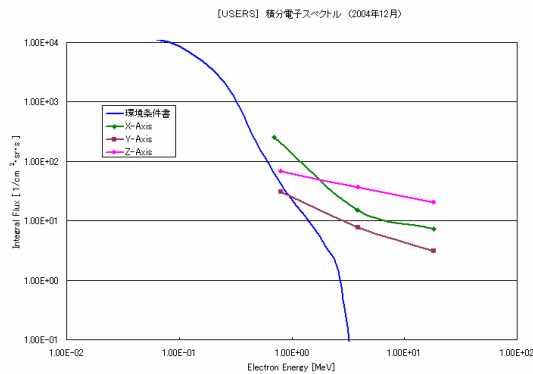


図 3 2 電子の積分エネルギー spectrol (USERS)

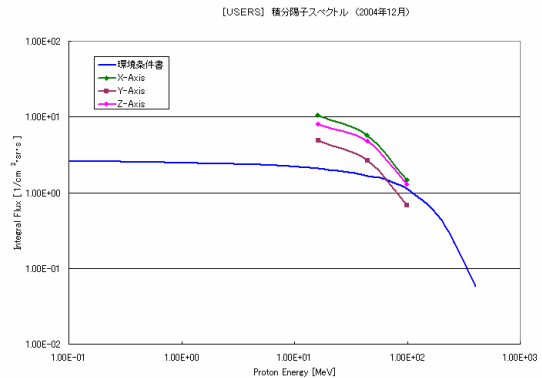


図 3 3 陽子の積分エネルギー spectrol (USERS)

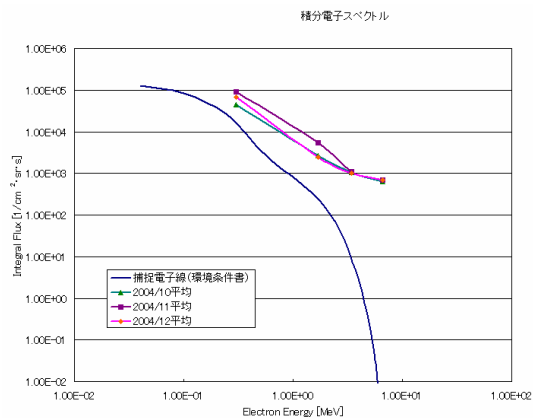


図 3 4 電子の積分エネルギー spectrol (SERVIS-1)

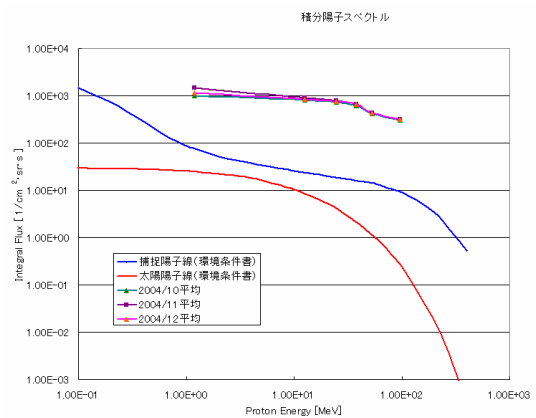


図 3 5 陽子の積分エネルギー spectrol (SERVIS-1)

積分エネルギー spectrol の図で、環境条件書と記している線は両衛星の設計に用いた宇宙放射線モデルとして NASA モデル (AE-8、AP-8) を使用したシミュレーション結果である。電子の積分エネルギー spectrol の高エネルギー側で計測結果とシミュレーション結果の間で大きな食い違いがあるのは、AE-8 モデル自体に高エネルギー成分が考慮されていないことに起因している。USERS の陽子エネルギー spectrol において、高エネ

ルギー側で減衰が大きいのは、計測エネルギー上限を超える成分の寄与を考慮していないことによる。USERS、SERVIS-1 の計測結果は、電子、陽子共に数倍から十数倍シミュレーション結果より大きい結果を示している。

3.4 ドーズの計測結果とシミュレーションの比較

USERS のドーズモニタの結果は解析方法の見直しをおこなっているため、SERVIS-1 のシールド付きドーズモニタ(PLU 構体外部)のドーズ - シールド厚の計測結果と NASA モデルを用いたシミュレーション結果との比較を図 3 6 に示す。

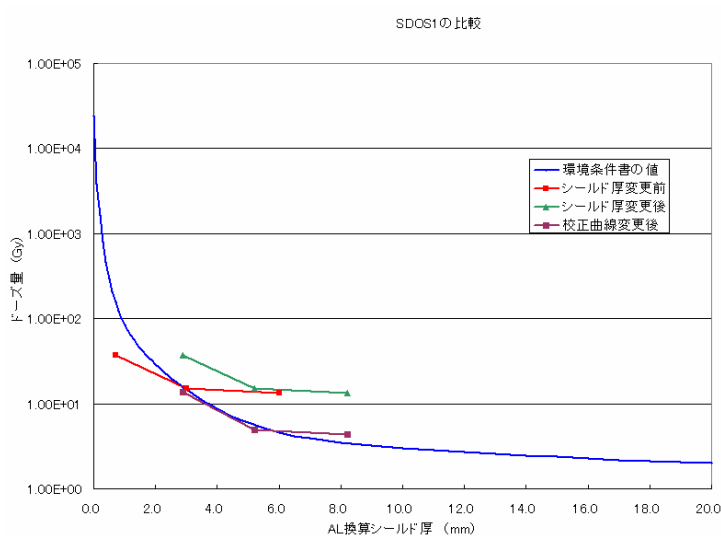


図 3 6 PLU 構体の外部に設置したドーズモニタ結果とシミュレーションの比較

図中で、曲線は環境条件書の値で NASA モデルを使用したシミュレーション結果である。また、3本の折れ線は計測結果であり、上からそれぞれ、構造材の効果を取り入れた評価結果、図 3 に示したドーズモニタの RADFET 周囲の構造材の効果は無視した評価結果、及び RADFET の電圧 - ドーズ校正曲線をガンマ線校正試験結果から評価した結果である。

なお、評価結果の妥当性を検証するため、ガンマ線と陽子線を用いた校正試験を再度実施中である。

4. おわりに

USERS、SERVIS-1 による中低軌道の異なる軌道における宇宙放射線環境を約 1 年間同時に計測してきた。計測されたデータの評価は現在進行中であるが、各センサの計測結果の間で不一致が見られる。特に、SERVIS-1 において、積分エネルギースペクトルの計測結果は図 3 4 , 図 3 5 に示すようにシミュレーション結果より約 1 0 倍大きい値を示しているが、シールド付きドーズモニタの計測結果は図 3 6 に示すように校正曲線を再測定

中ではあるが2～3倍の範囲でシミュレーション結果と一致している。

今後、詳細な解析や上記不一致の原因究明をおこなうこと、及びさらに計測を継続することにより、中低軌道における宇宙放射線環境データを提供していく予定である。

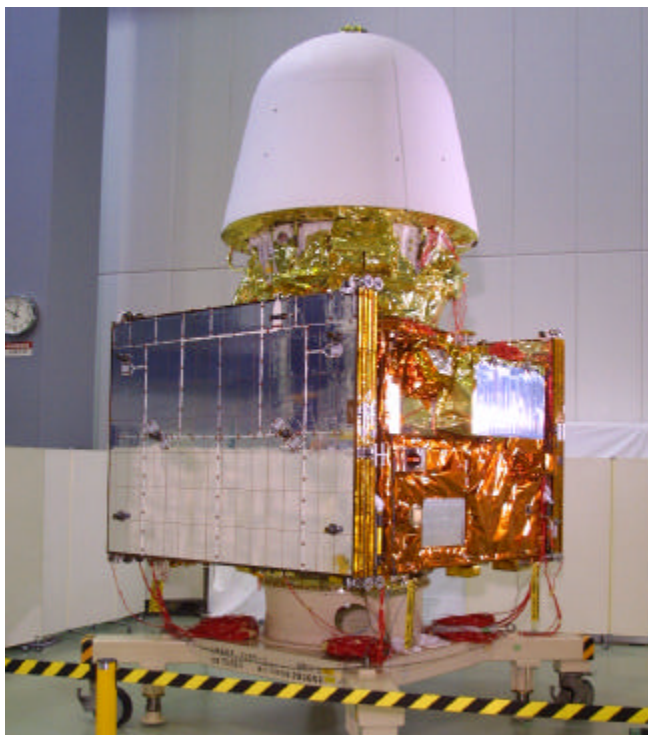


写真1 USERS衛星



写真2 SERVIS-1衛星