

# 「あけぼの」衛星による放射線帯粒子と 半導体素子の損傷の測定

高木俊治<sup>1)</sup>・中村尚司<sup>1)</sup>・河野 毅<sup>2)</sup>・塩野 登<sup>3)</sup>・林 克己<sup>4)</sup>・槇野文命

(1992年9月16日受理)

## Observation of Particle Flux and Damage on IC Devices in the Radiation Belt with AKEBONO Satellite

by

Shunji Takagi    Takashi Nakamura    Tsuyoshi Kohno

Noboru Shiono    Katsumi Hayashi    Fumiyoshi Makino

**Abstract :** Observation has been continuing on high energy particles and their effects on IC devices by using the radiation monitor, RDM, boarding on AKEBONE, since it was launched on February 22, 1989. The energy spectra and the intensity distributions of geomagnetically trapped charged particles (proton, electron and alpha particle) were measured during the period that the satellite passed through the high intensity area of the radiation belt. From the comparison between the observed data and the results calculated with the NASA models AP8 for protons and AE8 for electrons, it was found that the spatial distribution of observed particle intensities gave pretty good agreement with the models, but our absolute values were a factor of 2 to 10 deviated from the models' value. Single event effects on IC devices caused by energetic charged particles were observed together with charged particle intensities and the strong correlation was found between these two. This confirmed that the single event upsets were

1) 東北大学サイクロロン・ラジオアイソトープセンター

2) 理化学研究所

3) 日本電信電話株式会社 LSI 研究所

4) 日立エンジニアリング株式会社

caused mainly by energetic protons in the radiation belt. These observed results may be quite useful for evaluating the absorbed dose and the radiation damage on IC devices in the space environment.

## 概 要

「あけぼの」に搭載された、宇宙放射線の測定ならびにそれらによる半導体への影響を測定する装置 RDM による観測が打ち上げ日 (1989 年 2 月 22 日) 以来続けられてきた。この衛星は、放射線帯中を通過するので、放射線帯粒子 (陽子、電子、 $\alpha$  粒子) のエネルギースペクトルと強度分布の観測がなされた。観測結果を NASA の放射線帯モデル (AP8, AE8) と比較すると、強度の空間分布は一致するが絶対値は 2~10 倍の違いが見られる。また、半導体に荷電粒子が入射することにより発生するソフトエラーは、その発生点の分布が陽子強度分布と強い相関を示し、高エネルギー陽子とシリコンの核反応によるソフトエラーの発生が確認された。これらの結果は、宇宙環境における吸収線量や半導体素子の損傷の評価に大いに役立つであろう。

## 1. 序

宇宙空間には、銀河宇宙線をはじめとして、太陽フレア粒子や放射線帯粒子などの高エネルギーの荷電粒子が多く存在することはすでに様々な観測の結果から知られている。これらの荷電粒子は、宇宙機器や宇宙飛行士の被曝に多大な影響があり、とりわけ、放射線帯粒子および銀河宇宙線に含まれる高エネルギー粒子による影響が大きい。特に、地球近傍においては、地球磁場に捕捉された放射線帯粒子の強度が強いため、人工衛星や宇宙ステーションなどはその影響を考慮する必要がある。

宇宙放射線の強度は、様々な衛星やロケットなどにより測定されてきた。これらの測定結果を NASA では電子、陽子の強度分布について放射線帯モデルとしてまとめ、現在、宇宙環境における線量評価のための線源強度を計算するのに広く利用されている<sup>1~4)</sup>。

宇宙科学研究所の科学衛星「あけぼの」(EXOS-D) は、オーロラならびにオーロラに係する諸現象の観測を目的として打ち上げられ、高度約 250 km から 11000 km、傾斜角 75° と、磁気圏を横切るような極軌道を通る<sup>5)</sup>。そのため、衛星は放射線帯の粒子強度の高いところを通過することになることから、衛星の放射線帯粒子による影響を観測する放射線モニター (Radiation Monitor, RDM) が搭載された。

本研究は、この放射線モニターからテレメータにより地上に送られてくる観測データをまとめ、そのデータに基づいて得られた放射線帯の荷電粒子 (電子、陽子、 $\alpha$  粒子) の強度分布やエネルギースペクトルを求めたものである。この結果は、NASA の放射線帯モデルと比較し、このモデルの信頼性を検証する。特に  $\alpha$  粒子の分布についてはこれまで報告が少なく、半導体のシングリイベントとの関連も重要だと考えられる。また、RDM に含まれている半導体損傷検知用の IC に発生したシングリイベント、トータルドーズ効果を同時に観測し、実際の宇宙空間における半導体の放射線効果と放射線帯粒子強度との関係を明

らかにする。

## 2. 放射線モニター (RDM)

衛星に搭載された放射線モニターは大きく分けて二つの部分からなる。一つは、衛星に入射する高エネルギー荷重粒子(電子、陽子、 $\alpha$  粒子)強度を測定する高エネルギー粒子モニター(HPM)と、もう一つは、集積回路の放射線に対する劣化を測定するモニター(RIC)である。

### 2.1 高エネルギー粒子検出器 (HPM)

高エネルギー粒子検出器 (High Energy Particle Monitor, HPM) は衛星に搭載するために小型軽量の Si 表面障壁型半導 (SSD) の  $\Delta E$  検出器が用いられている。第 1 図にその概略図を載せる。この検出器は、4 枚の SSD (有効直径 10 mm、厚さ 0.2 mm) と、1 枚の Al (厚さ 0.1 mm)、2 枚の Cu (厚さ 0.3 mm、1.0 mm) の吸収材を組合せている。Al は太陽光を遮蔽する目的で一番外側に配置されている。

この検出器において、各入射粒子のエネルギーと、4 枚の SSD でそれぞれ失うエネルギーの関係は陽子、 $\alpha$  粒子については Ziegler 等の阻止能と飛程の計算コード TRIM85<sup>6)</sup> を用いて計算し、電子に関しては、次に示す阻止能を与える Bethe の式<sup>7)</sup> から計算した。

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left[ \ln \left( \frac{\beta\gamma\sqrt{\gamma-1} mc^2}{I} \right) + \frac{1}{2\gamma^2} \left\{ \frac{(\gamma-1)^2}{8} + 1 - (2\gamma^2 + 2\gamma - 1) \ln 2 \right\} \right] \quad (1)$$

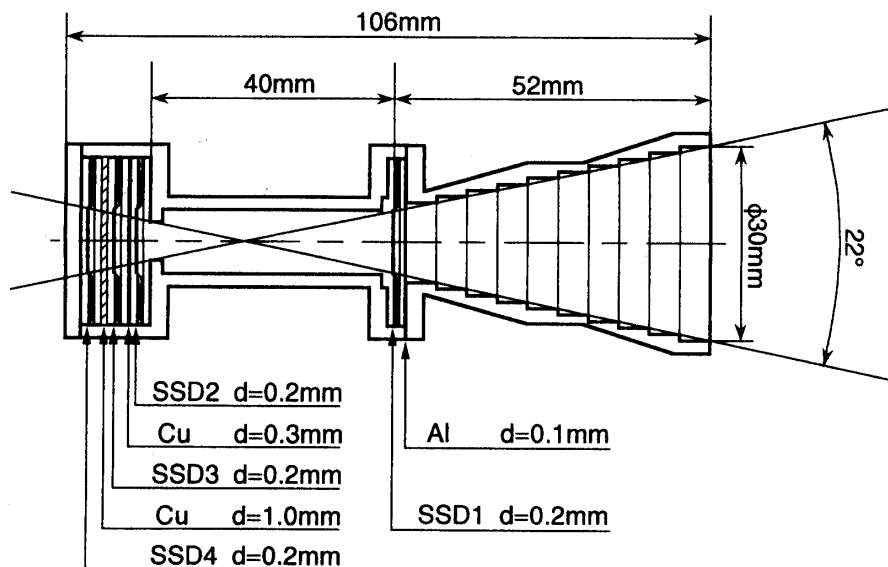


図1 HPM 検出器の断面図

$$\gamma = \frac{T + mc^2}{mc^2}$$

$$\beta^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

$T$ : 運動エネルギー

$Z$ : 物質の原子番号

$r_0$ : 古典的電子半径  $= 2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$

$mc^2$ : 電子の静止質量エネルギー  $= 0.511 \text{ MeV}$

$N$ : 粒子が通る物質中の  $1 \text{ m}^3$  当たりの原子の個数

$I$ : 物質の平均励起ポテンシャル

図2に電子、陽子、アルファ粒子の三種類の入射粒子エネルギーの関数としての SSD 中での吸収エネルギーを図示する。この図から、入射粒子により SSD1 で失うエネルギーが異なるので、SSD1 の出力信号に LLD1 (60 keV)、LLD2 (600 keV)、LLD3 (6 MeV) の3つのディスクリレベルを設けることにより、粒子の弁別が行われる。また、SSD2、SSD3、SSD4 において、SSD1 とコインシデンス、SSD2、SSD3、SSD4 どうしでアンチコインシデンスをとることにより、電子と陽子に関しては、3つのエネルギー範囲について測定が行われる。SSD で吸収されるエネルギーから計測する粒子とそのエネルギー範囲はそれぞれ表1に載せたようになる。

この計算の精度を確認するために、陽子、 $\alpha$  粒子入射に対してはハドロンカスケードモンテカルロコード HERMES<sup>8)</sup>、電子入射に対しては電磁カスケードモンテカルロコード EGS4<sup>9)</sup> を用いて SSD 中での吸収エネルギーを計算した。その結果、陽子、 $\alpha$  粒子に関しては TRIM85 の計算結果とほぼ一致した値が得られた。一方、電子に関しては図3に示すように違いが見られた。これらのモンテカルロ計算から得られた検出器の測定エネルギー範囲も表1に示した。

検出器は衛星の外表面上にスピン軸に対して垂直に向いており、その視野角は中心の回りに  $\pm 11^\circ$  である。

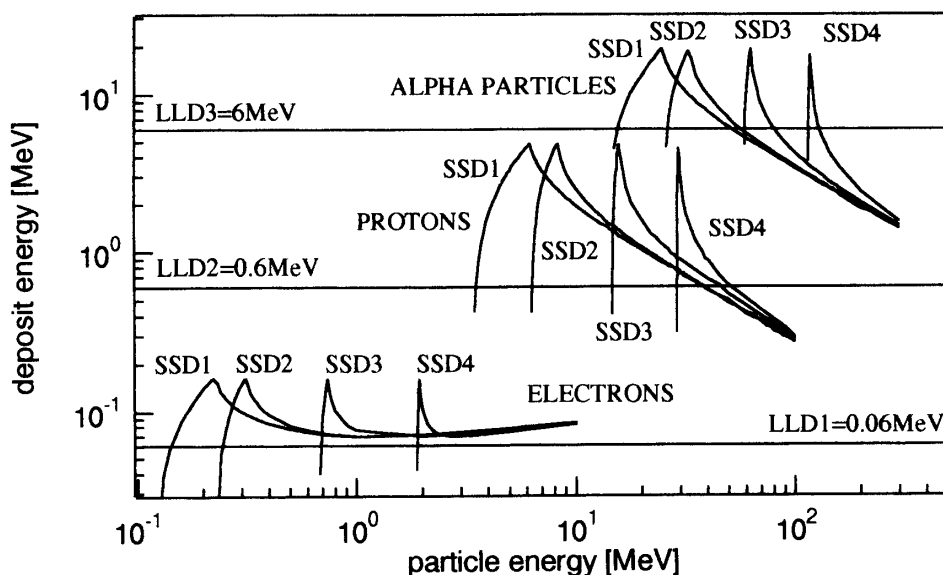


図2 電子、陽子、 $\alpha$  粒子の入射エネルギーに対する HPM 検出器の SSD 中でのエネルギー損失

表 1 測定粒子とエネルギー範囲

CHANNEL NAME	PARTICLE	ENERGY RANGE(MeV)	
		calc. from stopping power	calc. by Monte Carlo
eE 1	electron	2.0<	2.5<
eE 2	electron	0.7-2.0	0.95-2.5
eE 3	electron	0.25-0.7	0.3-0.95
pE 1	proton	30-38	30-38
pE 2	proton	15-30	15-30
pE 3	proton	6.4-15	6.4-15
AA	alpha particle	15-45	15-45

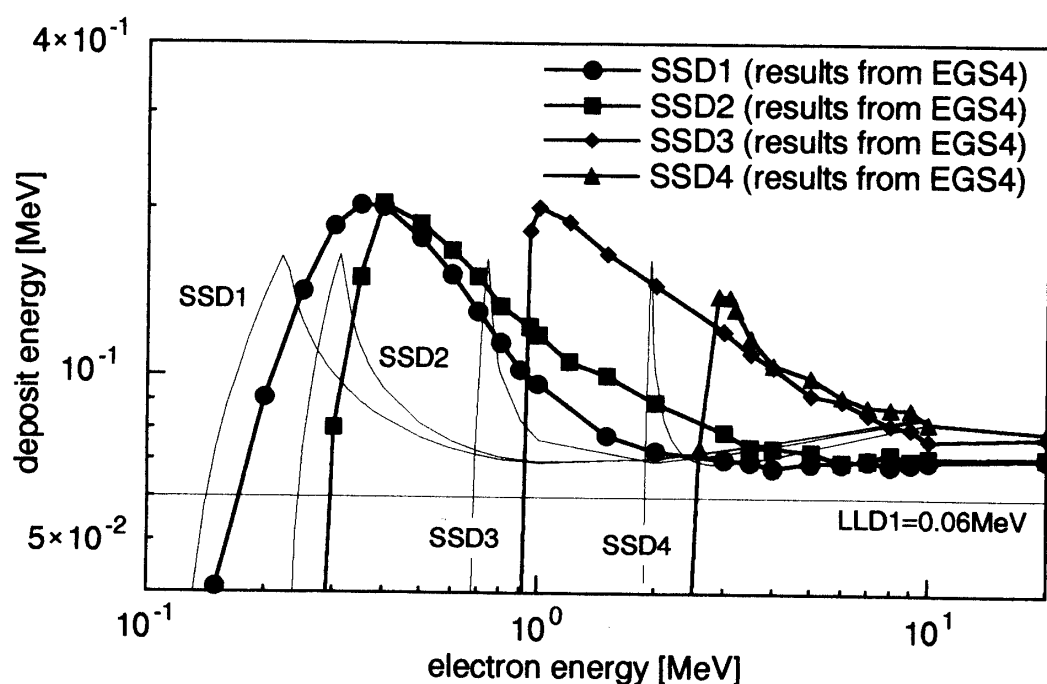


図 3 電子の入射エネルギーに対する SSD 中に沈着するエネルギーの EGS4<sup>9)</sup> による計算と Bethe の式による計算との比較

また、この検出器の幾何学的要素（単位は  $\text{cm}^2\text{sr}$ ）は、

$$G = \frac{\pi^2}{2} [r^2 + R^2 + h^2 - \sqrt{\{(r-R)^2 + h^2\} \{(r+R)^2 + h^2\}}] \quad (2)$$

$r$ ：検出器の半径

$R$ ：入射窓の半径

$h$ ：入射窓と検出器の間の距離

から計算され、電子、陽子の場合には図 1 に示すように SSD2 の前の窓（直径 6 mm）で視野が限られるため、

$$r=0.3 \text{ cm}, \quad R=1.5 \text{ cm}, \quad h=9.2 \text{ cm}$$

となり、

$$G=0.023 \text{ cm}^2\text{sr}$$

と計算される。 $\alpha$  粒子の場合は、SSD1 のみで検出するので、

$$r=0.5 \text{ cm}, \quad R=1.5 \text{ cm}, \quad h=5.2 \text{ cm}$$

となり、

$$G=0.19 \text{ cm}^2\text{sr}$$

となる。

## 2.2 半導体の放射線効果モニター (RIC)

半導体の放射線効果モニター (Radiation Effect on IC Monitor, RIC) はシングレイベントの発生を検出する RAM 測定部と、トータルドーズ効果を見るための MOS トランジスタのしきい電圧の変化を観測するトランジスタ測定部からなる。

### RAM 測定部

シングレイベント検出用の 64 k-SRAM は日本電信電話株式会社 (NTT) で研究用に試作されたもので、規格は市販品に準じたものであり、ラッチアップ耐量向上策としてメモリセル部分に epi-substrate とウェルソース構造を採用したものである<sup>10)</sup>。このメモリを 4 個搭載して 8 bits-32 kwords のメモリとして機能させ、随時データの読み、書きを 2 回ずつ行い、データの反転が一回しか見られなかった場合は、ソフトエラー (soft error, single event upset, SEU)、2 回ともデータが反転した場合、あるいは、RAM の電源電流が増加して 100 mA に達した場合は、ラッチアップ (hard error, single event latch-up, SEL) とみなしている。図 4 はこれらのフローチャートを図示している。

また、この SRAM は、東京大学原子核研究所の SF サイクロトロンを用いた重イオン (Ni-119 MeV, O-145 MeV, Ar-73 MeV) により照射され、

sensitive junction area  $50 \mu\text{m}^2$

effective track length  $5.8 \mu\text{m}$

臨界電荷  $3.5 \text{ MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \text{cm}^2$

ラッチアップ断面積  $1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{bit}^{-1}$  以下

とそれぞれ評価されている<sup>10)</sup>。

### トランジスタ測定部

MOS トランジスタは、24 ピンセラミック DIP に入ったチャンネル長  $5 \mu\text{m}$  の p-channel, n-channel を一個ずつ用い、交互にそれぞれ  $10 \mu\text{A}$ ,  $40 \mu\text{A}$  の電流を drain-source 間に加え、その時の gate 電圧を測定してしきい電圧を求めている。

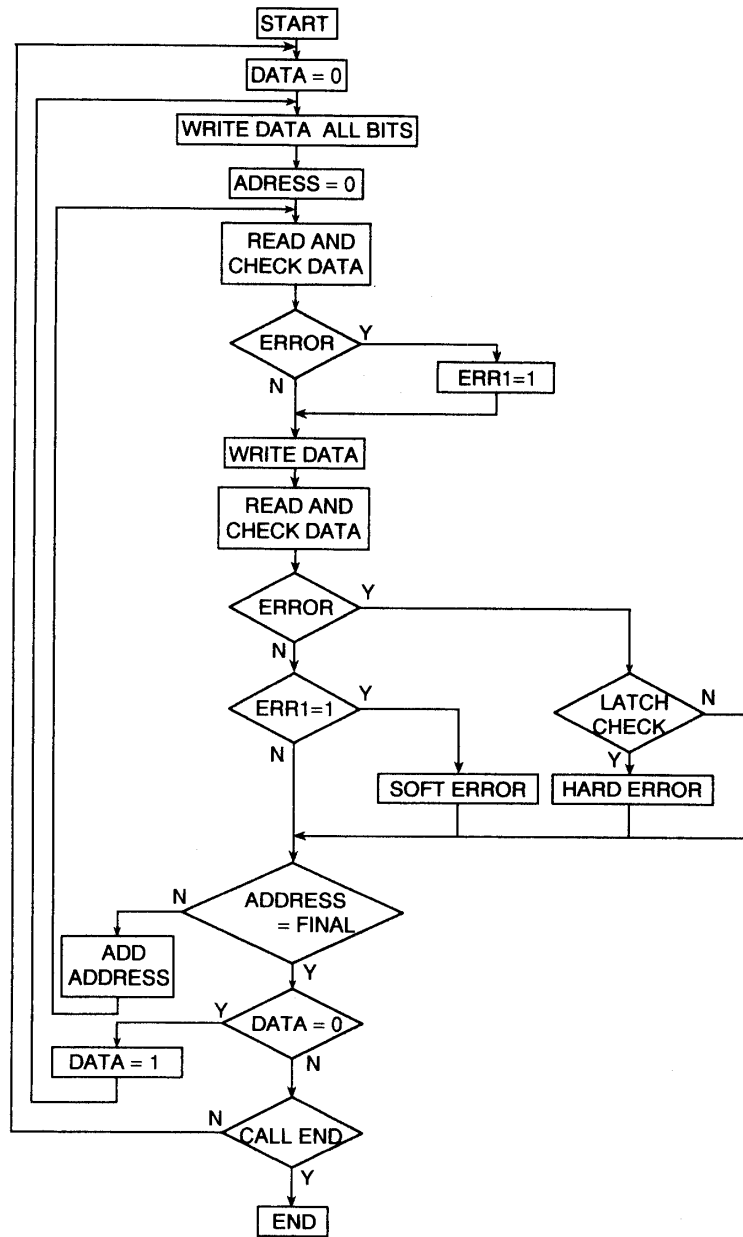
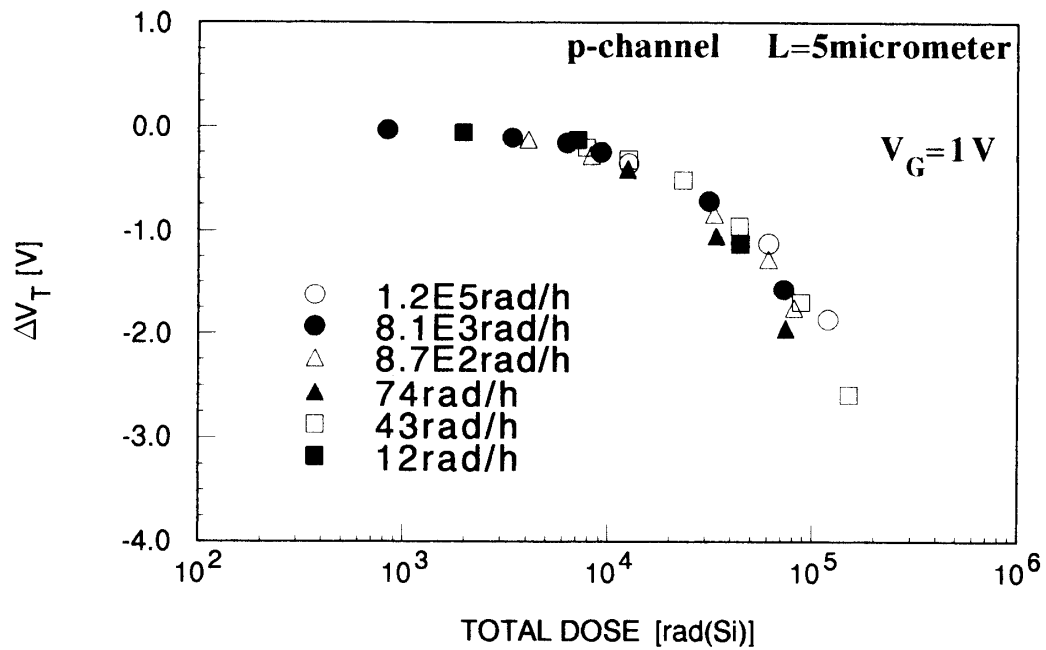
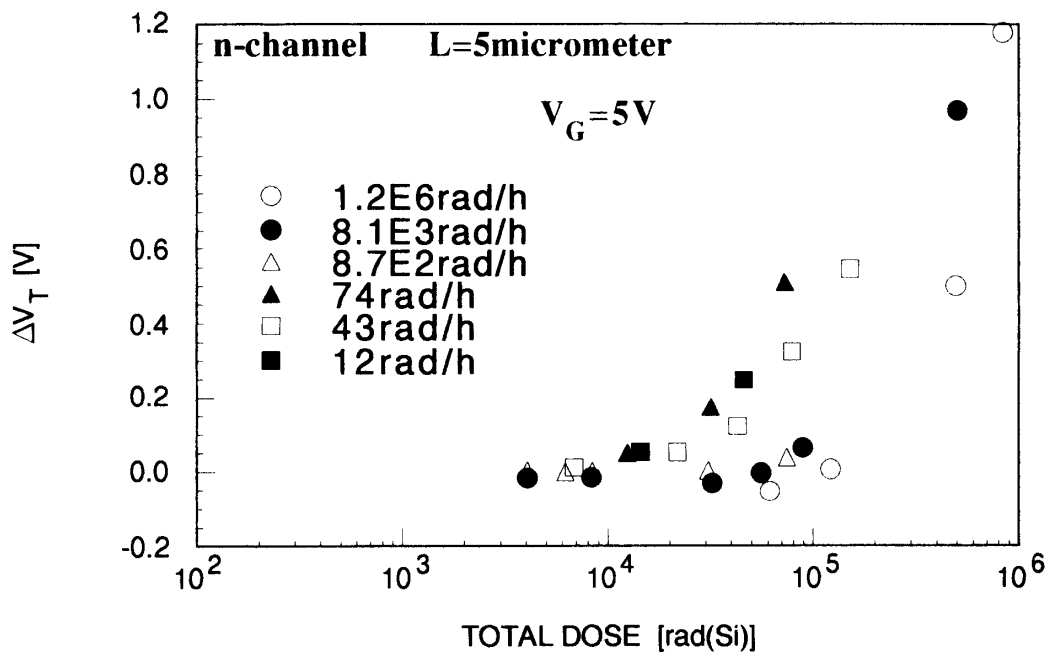


図4 シングルイベント検出回路のフローチャート



(a) p-channel MOSFET



(b) n-channel MOSFET

図5  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線による MOS トランジスタの吸収線量（トータルドーズ）としきい電圧の変化



しきい電圧の変動分からトータルドーズの推定を行うことができるように、Si での吸収線量としきい電圧の変動の関係が、 $^{60}\text{Co}$  からの  $\gamma$  線で測定されている。(図 5)<sup>11)</sup>

### 3. 観測結果と考察

観測は 1989 年 2 月 22 日打ち上げ以来、3 年以上にわたって続けられているが、現在までに得られた観測結果の主なものについて述べていく。

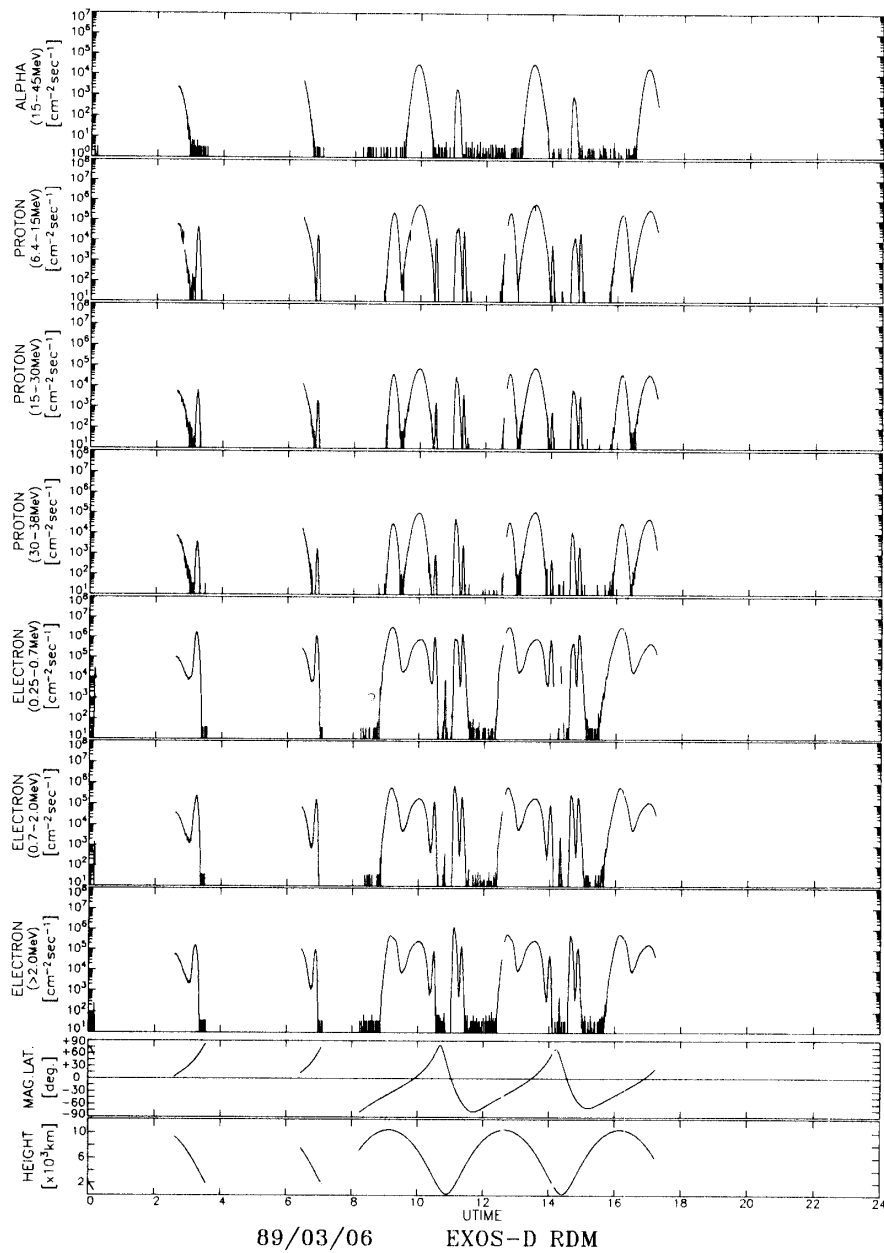


図 6 1989 年 3 月 6 日の電子、陽子、 $\alpha$  粒子の強度変化

### 3.1 HPM データ

一日の粒子強度 (単位  $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ) の時間変化の例として、打ち上げ後 RDM の電源を入れた時期に近く、比較的連続したデータがある 1989 年 3 月 6 日 (UT) の観測結果を図 6 に図示する。図は、表 1 に示す 7 つの粒子およびエネルギーのチャンネルでの粒子束を UT を横軸に示してあり、最下段に衛星位置の地磁気緯度と高度が示されている。衛星の軌道データから、この頃の衛星の軌道は北半球 45 deg. あたりが近地点で、南半球 45 deg. あたりが遠地点になっている。衛星は常時アンテナで追跡されていないので、この図の様にデータが欠損している時間帯がある。粒子強度は、16 sec 間の平均をとっているが、衛星はスピン周期を約 8 sec になるように制御されていることから全方向から入射する粒子の平均をとっていると近似できる。

粒子強度と衛星の軌道との関係を見ると、まず電子と陽子については磁気赤道付近に比較的ゆるやかな粒子強度のピークと、南北半球の 60 deg. 付近にするどいピークがある。電子と陽子とでは、磁気赤道付近のピークの絶対値がほぼ同じなのにもかかわらず、電子の方が 60 deg. 付近のピークは値が高く、高度によっては磁気赤道付近の値より高くなっている。また、高度が違うため、北半球と南半球の同じ緯度では、南半球での方が大きくなっている。エネルギー別にみると、ピークの位置、形はさほど変わらないが、高いエネルギーになるに従い粒子強度は小さくなる傾向にある。

$\alpha$  粒子 (15~45 MeV) は 60 deg. 付近のピークがなく、赤道上のピークしか見られない。強度は、陽子 (6.4~15 MeV) の 1% ほどになっている。また、この図から、陽子、電子、 $\alpha$  粒子の強度が衛星の位置により特徴づけられることから、ほぼ他粒子の混在がなく測定が正しく行われていると考えられる。

図 7 は検出できる最高のエネルギー領域の陽子 (30~38 MeV) の粒子強度の一日の平均値の日変化を図示したものである。この図において、経過日数が 120 日、410 日ごろに強度が極大になっている。これらの時期は、「あけぼの」が赤道面を高度 4000 km 付近で通過する時であり、粒子強度が一番高くなっている領域に軌道があるからであると推測できる。

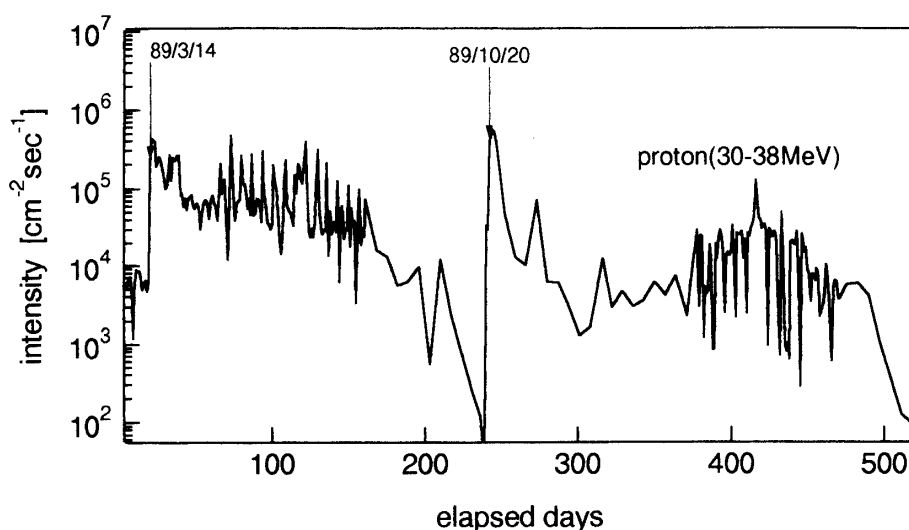


図 7 陽子 (30~38 MeV) 強度の日平均の経時変化

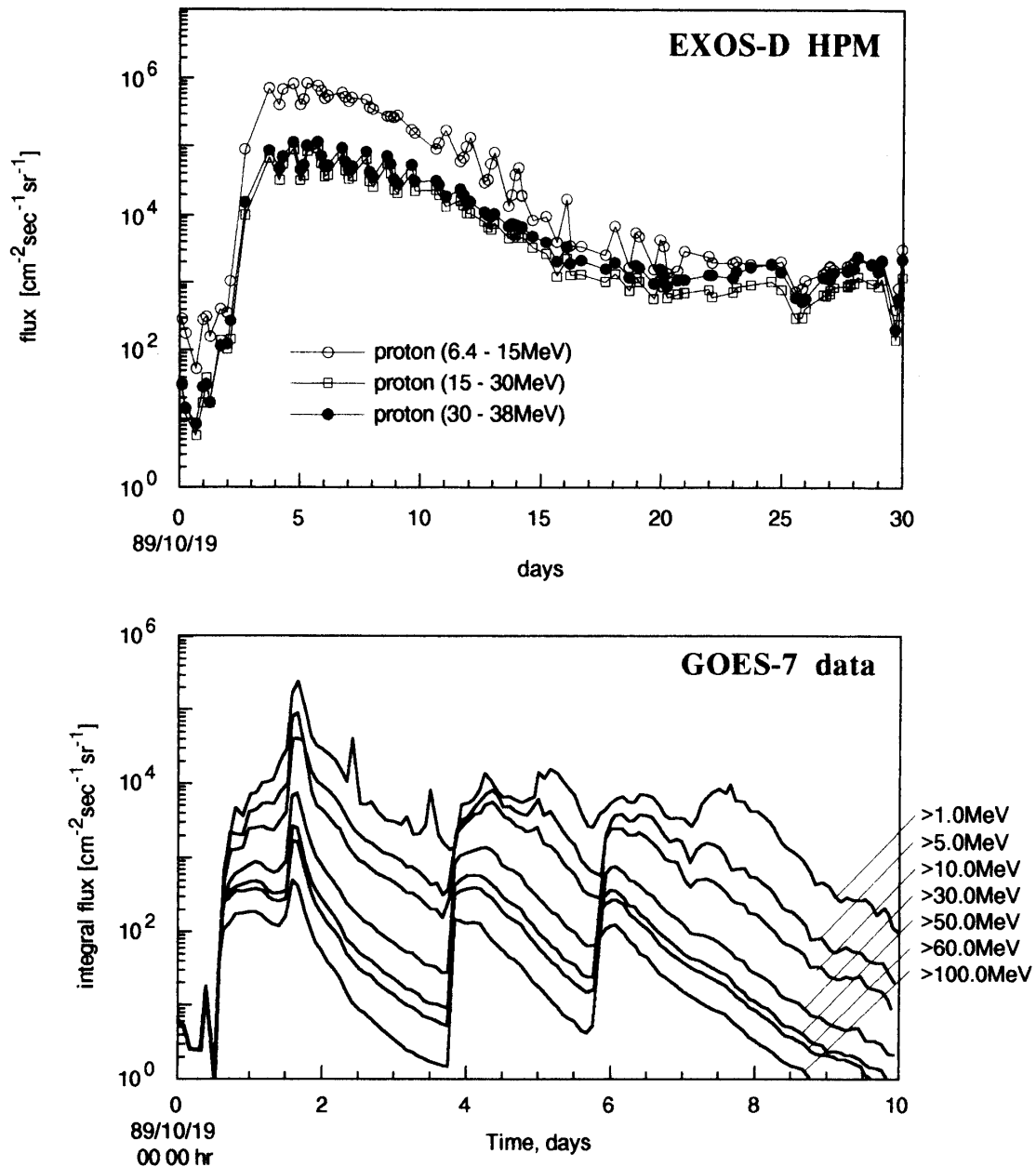


図8 1989年10月19日に発生した太陽フレアによる陽子の強度変化の「あけぼの」での測定値とGOES-7での測定値<sup>12)</sup>との比較

また、経過日数が20日、240日ごろに急激に強度が増加している。これらのピークは1989年3月9日、1989年10月19日に発生した大きな太陽フレアにより太陽宇宙線が大量に放射線帯に流入したものと考えられる。しかし、放射線帯粒子の増加の機構は必ずしも明らかでない。

図8は1989年10月19日に発生した太陽フレアの後の、磁気赤道高度約9500 km (衛星がその頃通過している領域)での陽子の強度変化を、アメリカの衛星GOES-7に搭載されている検出器で測定されていた同じ時期の陽子の強度変化<sup>12)</sup>と比較している。GOES-

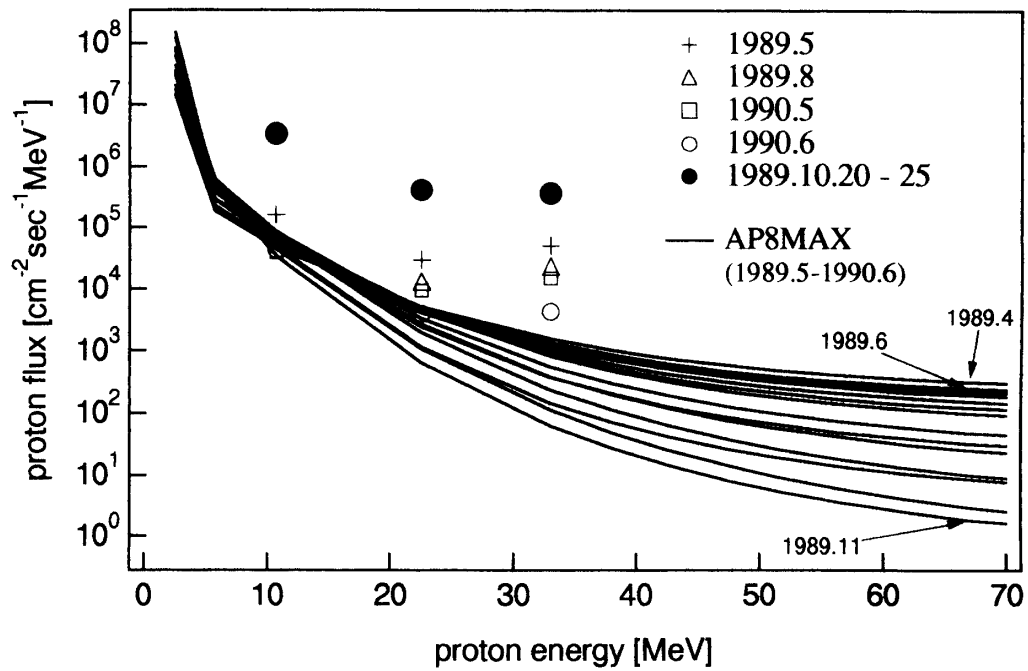


図 9 1989 年 5 月から 1990 年 6 月の月平均陽子エネルギースペクトルの測定値と AP8MAX<sup>1)</sup> との比較

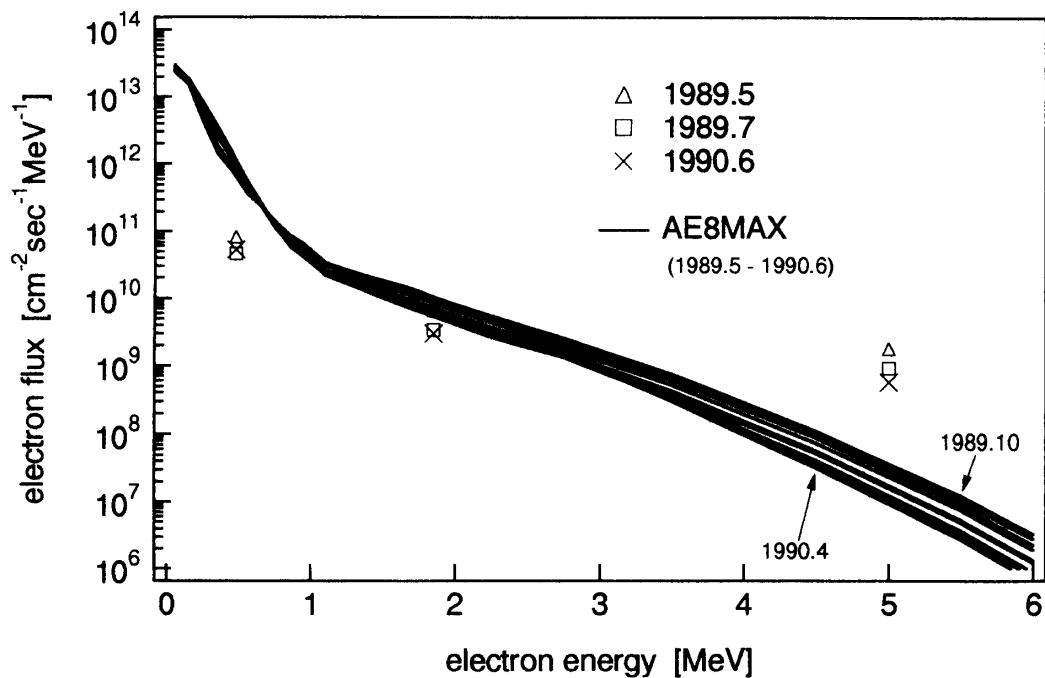


図 10 1989 年 5 月から 1990 年 6 月の月平均電子エネルギースペクトルの測定値と AE8MAX<sup>2)~4)</sup> との比較

7 は静止軌道衛星（高度 36000 km）で「あけぼの」とは軌道が異なり、「あけぼの」は放射線帯の中を通過するので粒子強度は HPM 検出器で測定された方が 2 桁近く多くなっている。

太陽フレアにより陽子の強度が増加し始めるのは、GOES-7 は約半日後なのに対して、「あけぼの」では約 2 日後であった。また、GOES-7 では 10 月 23 日、10 月 25 日にも陽子の増加が見られるが「あけぼの」ではみられない。さらに、陽子の半減期を見ると、GOES-7 では約 16 時間であるが、「あけぼの」では約 4 日とかなり長くなっている。この様に、静止軌道上（高度約 36000 km）では太陽フレア粒子が直接来るのに対して、放射線帯中には地球磁場により、陽子が入りにくく、また、生存期間が長くなるという特徴が現れている。

### 3.2 エネルギースペクトル

電子と陽子については、それぞれ 3 つのエネルギー範囲に分けて測定しているので、大まかなスペクトルをとることができる。図 9、図 10 に 1989 年 5 月から 1990 年 6 月までの間で、陽子と電子の一ヵ月平均のエネルギースペクトルについて測定し結果を図示する。また、この期間の衛星の軌道を ORB コード<sup>13)</sup> で計算し、ORP コード<sup>13)</sup> で一ヵ月間の軌道上での粒子強度を NASA の放射線帯モデルから求めて平均した結果も載せている。太陽活動の 11 年周期から考えると、1990 年ごろに活動が極大になるので、放射線帯モデルのうち、太陽活動が極大期における陽子の分布を与える AP8MAX<sup>1)</sup>、電子の分布を与える AE8MAX\* を用いて計算した。モデルからの計算値が何本もの曲線になっているのは、衛星が時間を追うごとに近地点が遷移していき、約一年で地球を一周するからで、スペクトルの形も絶対値も大きく変化している。特に電子に比べて陽子の高エネルギー領域の粒子束の変化が大きく最大と最小で約 2 桁違っている。これに対応して観測値もその絶対値は変化し、やはり、電子より陽子の方が変動が大きい（最大と最小で約 1 桁の差）。また、陽子の方には上述の 1989 年 10 月 19 日の太陽フレアにより強度が高くなった時の値も図示している。陽子と電子のスペクトルの形は、観測値に比べてモデルの値の方が傾きが急、つまり軟らかくなっているが、とくに電子スペクトルでの違いが大きく、1 MeV 以下のエネルギー領域で 1 桁ほどモデル値が高いにもかかわらず、高いエネルギー領域で 1 桁ほど低くなっている。また、陽子の太陽フレアによる増加は、モデルからの計算値と比較して低いエネルギーで約 1 桁、高いエネルギーでは 4 桁ほど高くなっている。

### 3.3 粒子の強度分布

測定データから、地球半径を基準とした高度、磁気緯度に対する粒子強度分布を求めた。図 11 に電子（0.25～0.7 MeV）、陽子（6.4～15 MeV）、 $\alpha$  粒子（15～45 MeV）についての 1989 年 5 月から 1990 年 7 月までの期間で平均した粒子強度分布を載せている。但し、これらの図には大きな太陽フレア等により地球磁場の擾乱が起きた時のデータは省いている。粒子強度は、緯度に関しては 5°、高度に関しては 1000 km でメッシュをきり、その

\* AE8 は、AE4<sup>2)</sup>、AE5<sup>3)</sup> 並びに AE6<sup>4)</sup> をまとめて一つにし、少し改良したモデルである。

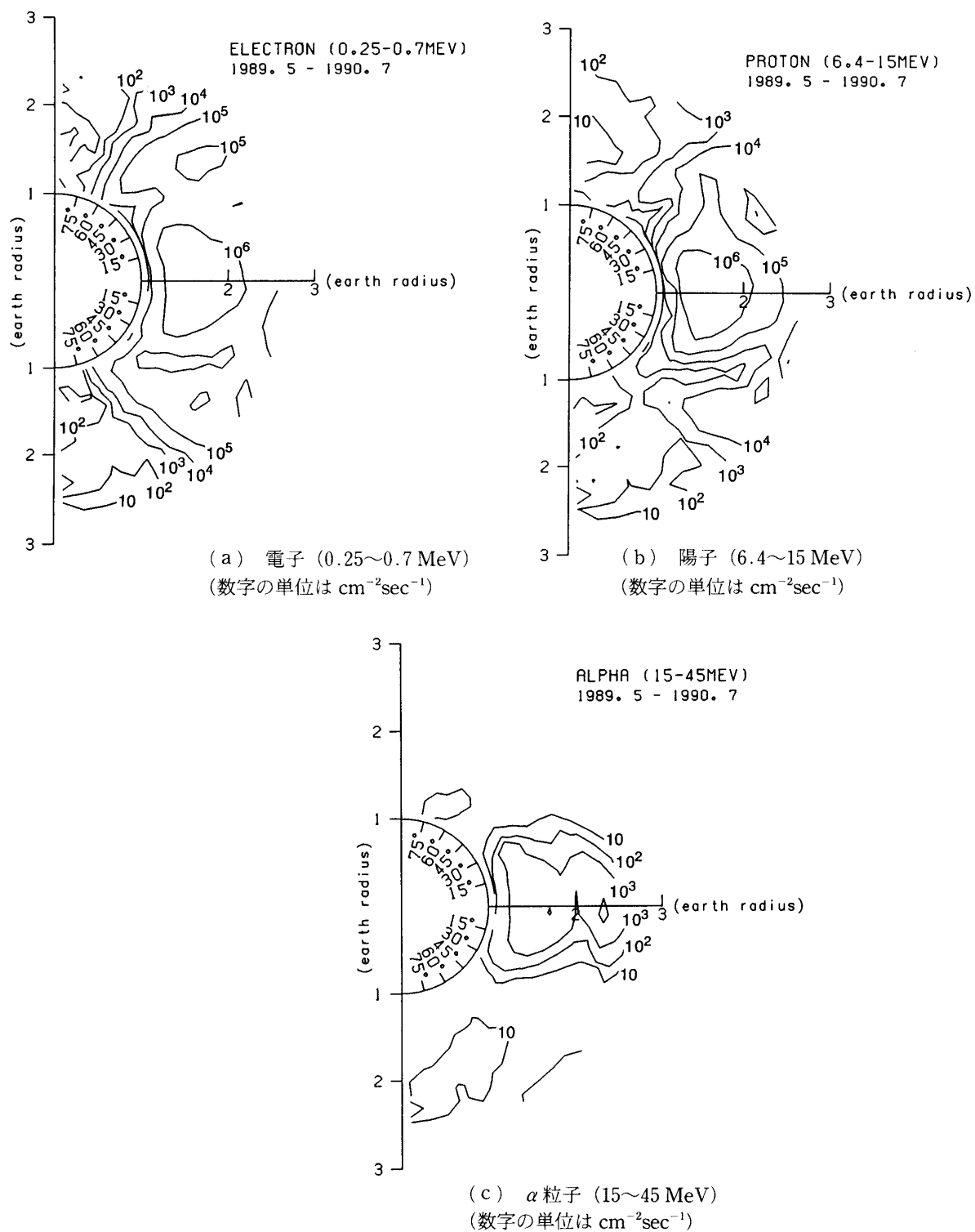


図11 1989年5月から1990年7月における平均の放射線帯粒子強度の空間分布

中での算術平均をとった。それぞれ、磁気赤道付近の 1.7 地球半径（高度約 4500 km）あたりにピークがあり、よく知られている放射線帯の内帯のピーク位置と一致した結果が得られた。電子については、「あけぼの」の軌道よりも高高度（5 地球半径あたり）にある外帯から回り込んできている粒子が、南北半球の 45° 付近に観測されている。陽子は、ピークは内帯しかないために電子のような中緯度付近の強度が高くなることはないのであるが、観測結果からはとりわけ南半球にそれがみられる。

陽子（6.4～15 MeV）、電子（0.25～0.7 MeV）について NASA モデルのピーク部で見ると、陽子は AP8MAX<sup>1)</sup> から磁気赤道上の 1.8 地球半径のところで粒子強度は最大で  $8.69 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 、電子も AE8MAX<sup>2)~4)</sup> から磁気赤道上の 1.8 地球半径のところで最大値  $1.04 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  となる。測定結果と比較すると、陽子は約 2 倍測定値の方が大きくなっているが、逆に電子は、モデルの値が約 10 倍大きくなっている。図 10 の電子のスペクトルで 1 MeV 以下のエネルギー領域で、計算値より測定値が約 1 桁低くなっている。このエネルギー領域でモデルが過大評価している。粒子強度の測定値は、電子、陽子がピーク位置で約  $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  となっているのに対し、 $\alpha$  粒子は約  $10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  と陽子、電子の 1/100 倍の強度である。 $\alpha$  粒子の強度分布のデータはまだ少ないので、この結果は貴重なデータになるであろう。

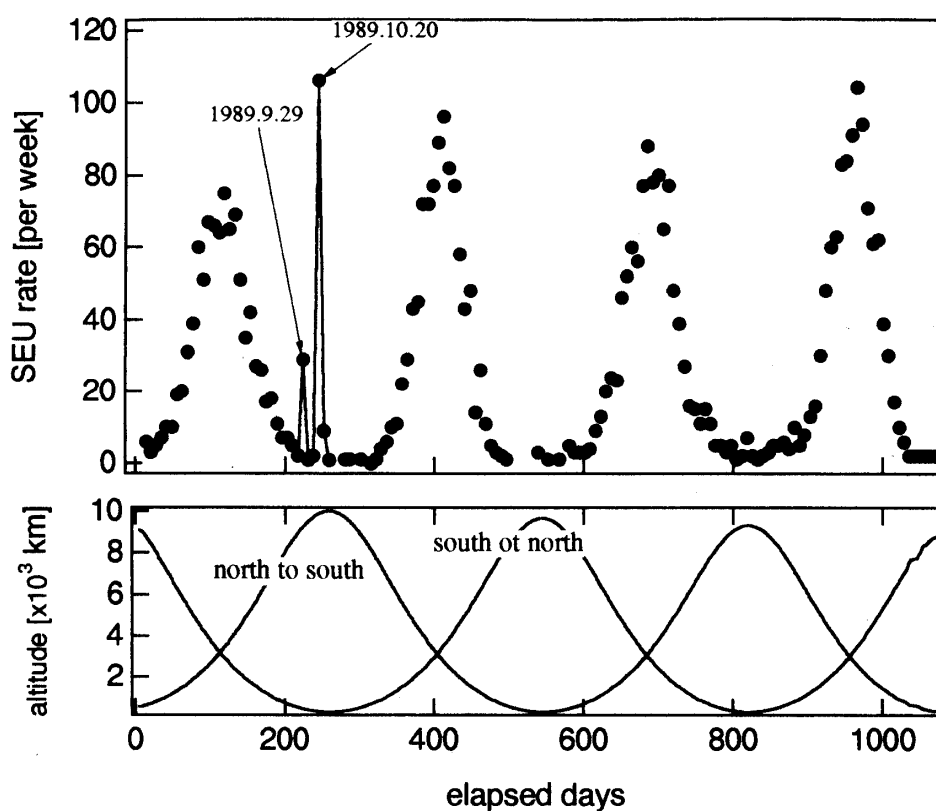


図 12 SEU 発生数の時間変化と衛星が磁気赤道面を通過する時の高度

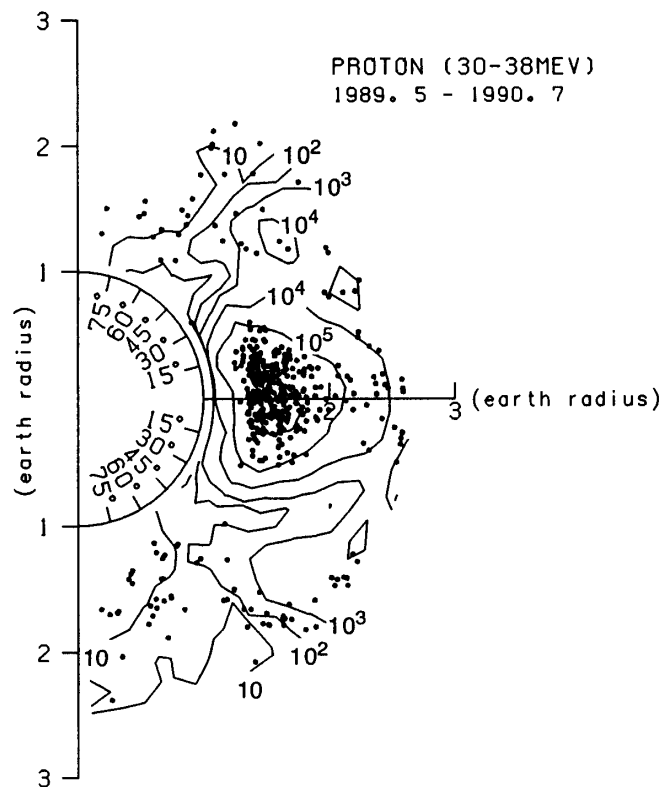


図 13 SEU 発生点と陽子 (30~38 MeV) 強度の空間分布

### 3.4 半導体のシングルイベント

衛星打ち上げ後から 1991 年 12 月までの SEU の発生数の変化と「あけぼの」が磁気赤道面を通過する時の高度を図 12 に示した。この図より、120 日、410 日、680 日、970 日付近で SEU の発生数が多くなっているが、この時、「あけぼの」は磁気赤道面を約 4000 km (1.6 地球半径) の高度で通過しており、図 11 から放射線帯の粒子強度のピーク部分を通過していることがわかる。また、経過日数 240 日 (1989 年 10 月 20 日) ごろに一時的に発生率が増加しているが、これは、この頃に発生した大きな太陽フレアによる太陽宇宙線が増加したためであると考えられる。

図 13 に、SEU の発生した位置を磁気緯度、地球半径を基準にした高度の二次元座標に図示した。但し、この図は大きな太陽フレアの発生した前後のデータはのせていない。また、発生位置については、全時間のデータがあるわけではないので 30% ほどしか同定できなかった。またこの図には同時に計測した放射線帯粒子のうち、陽子 (30~38 MeV) の 1989 年 5 月から 1990 年 7 月にける平均粒子強度分布も重ねて示している。この図から、放射線帯の粒子強度の高いところ (赤道上の高度が地球半径の 1.6 倍付近) に多く発生していることがわかり、図 12 の緩いピークの形成が理解できる。

SEU 検出用の素子の臨界電荷は  $3.5 \text{ MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \text{cm}^2$  で実効的な Si 厚が  $5.8 \mu\text{m}$  であることから、素子中での必要な吸収エネルギーは  $4.7 \text{ MeV}$  となり、電子、陽子や、 $\alpha$  粒子では SEU を起こすことはない。粒子強度を考慮すると、放射線帯の陽子と Si との核反応、



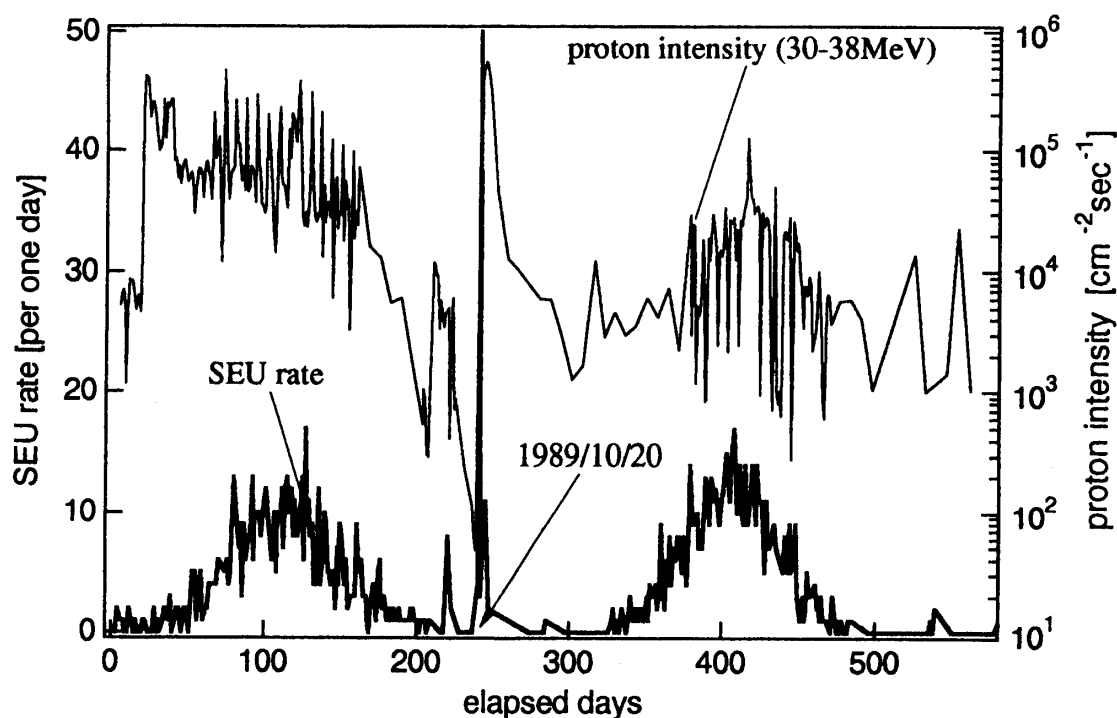


図 14 SEU 発生率と陽子 (30~38 MeV) 強度の時間変化

主に (p, pα) 反応により発生した重イオンによるものと考えられる。

そこで、臨界電荷  $3.5 \text{ MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^2$  から、陽子による SEU の発生断面積は、文献 14 にある (p, pα) 反応断面積から SEU 発生断面積を計算した値<sup>15)</sup> を用いて、 $3.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^2 \text{ proton}^{-1} \text{ bit}^{-1}$  と計算できる。

一方、1989 年 6 月から 1990 年 6 月までの SEU の発生数を調べ、この期間で SEU が比較的多く発生した時期を選び、SEU 発生数ならびに粒子強度を求めた。図 14 に一日当たりの SEU の発生率と陽子 (30~38 MeV) の強度の時間変化を図示した。ここで、Si の (p, pα) 反応の断面積が 20 MeV 付近から大きくなる<sup>14)</sup> ので、このエネルギー以上の陽子強度を求める。RIC は HPM と違って衛星内部に設置されているので、衛星本体の側面パネル (8 mm 厚の Al ハニカム板) と RIC の外壁 (2 mm) の合計 1 cm 厚の Al が陽子に対して遮蔽材となる。Al 1 cm 通過後に Si の (p, pα) 反応に必要な 20 MeV のエネルギーが残るような陽子のエネルギーは、 $dE/dx$  の計算から 53 MeV となる。しかし、HPM 検出器は、陽子については 38 MeV 迄しか測定できない。そこで、図 9 に示した NASA の放射線帯モデル (AP8MAX) によるエネルギースペクトルの計算値を HPM の観測値に規格化し、53 MeV 以上の陽子の強度を求めた。一週間毎の SEU の発生数を求め、上述の陽子強度から発生断面積を求めた。その結果を表 2 に載せた。それらの平均をとり、SEU の平均発生断面積を求めると、 $2.1 \pm 2.0 \times 10^{-15} \text{ cm}^2 \text{ proton}^{-1} \text{ bit}^{-1}$  となった。

加速器を用いて地上で測定した断面積 ( $3.0 \times 10^{-14} \text{ cm}^2 \text{ proton}^{-1} \text{ bit}^{-1}$ ) に比べて、宇宙空間で測定された断面積が 1/10 ほどになったが、これは、NASA のモデルを用いて陽子の粒

表 2 1 週間毎の SEU 発生断面積 (抜粋)

date	SEU rate [per week]	pE 1* intensity [ $\times 10^4 \text{cm}^{-2} \text{sec}$ ]	f <sup>†</sup>	SEU cross section [ $\times 10^{-15} \text{cm}^2 \text{proton}^{-1} \text{bit}^{-1}$ ]
89.7.5	51	3.20	4.07	1.23
89.7.19	42	3.73	3.48	1.02
89.8.9	17	1.60	2.47	1.36
89.8.23	11	0.552	1.89	3.34
90.3.7	72	2.62	4.09	2.12
90.3.21	77	2.02	4.56	2.64
90.4.4	96	2.35	4.61	2.79
90.4.18	77	3.45	4.31	1.63
90.5.9	48	2.14	3.11	2.27

\*pE 1…proton(30~38 MeV)

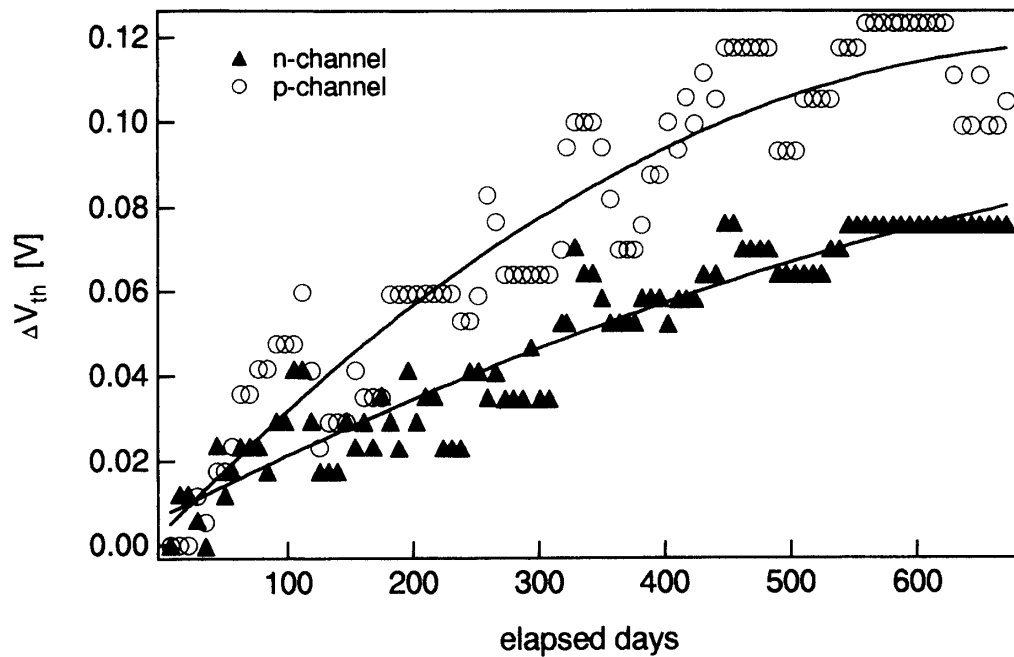
†f… $\frac{\text{above 53 MeV proton}}{\text{30~38 MeV proton}}$ calculated from AP 8 MAX

図 15 MOS トランジスタのしきい電圧値の時間変化

子強度を求めているので、前述のエネルギースペクトルの結果から観測値が高くなっているため、粒子強度が過大に評価されたためと思われる。

一方、SEL に関しては、1992 年 3 月までの時点で一回も発生していない。

### 3.5 半導体のトータルドーズ効果

MOS トランジスタのしきい電圧の変化の様子を図 15 に載せた。常温付近ではアニール

があるため、線量率により変化の割合がかわるので、経過日時により線量率が変化してしきい電圧が上下しているのが見られる。おおよその変化をみるために二次関数にフィットさせたところ、600 日で p-channel は 0.11 V、n-channel は 0.07 V 変化している。これらの値から、図 5 に示した  $^{60}\text{Co}$  で較正した値を用いて Si での吸収線量を求めると、40 Gy (Si) となる。

衛星中の大まかな線量分布を求めるために、衛星を半径 70 cm のアルミニウムの均質球と仮定して、吸収線量を計算した。ここで、衛星の重量が 290 kg であることからアルミニウムの密度を  $0.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  として三次元モンテカルロ計算コード (陽子は HERMES<sup>8)</sup>、電子は EGS4<sup>9)</sup>) を用いた。また、簡易線量計算コード SHIELDOSE<sup>10)</sup> も計算に用いた。衛星に入射する電子、陽子の線源スペクトルは AP8MAX、AE8MAX を用い、衛星の一年間の軌道の平均値とした。図 16 に計算結果を図示する。測定用 MOS トランジスタは衛星表面から 1 cm 内部にあることから、その点での吸収線量は電子に関しては  $5.2 \times 10^{-1} \text{ Gy (Al)} \cdot \text{day}^{-1}$ 、陽子に関しては  $3.4 \times 10^2 \text{ Gy (Al)} \cdot \text{day}^{-1}$  となる。すなわち、吸収線量に関しては陽子が支配的であることが分る。MOS トランジスタによる測定と比較すると、Si の密度が  $0.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  なので、計算で求めた吸収線量を 1/7.8 倍して、Si での吸収線量に換算すると  $2.6 \times 10^4 \text{ Gy (Si)}$  となる。計算値と比較して、測定値はかなり小さいが、これは複雑な構造の衛星を密度  $0.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  の均質 Al 球と近似したことによる誤差が大きい。また、荷電粒子の強度が一定でなく、空間分布をもっているため、半導体素子のアニールによりしきい電圧値が元に戻る減少効果も無視できない。

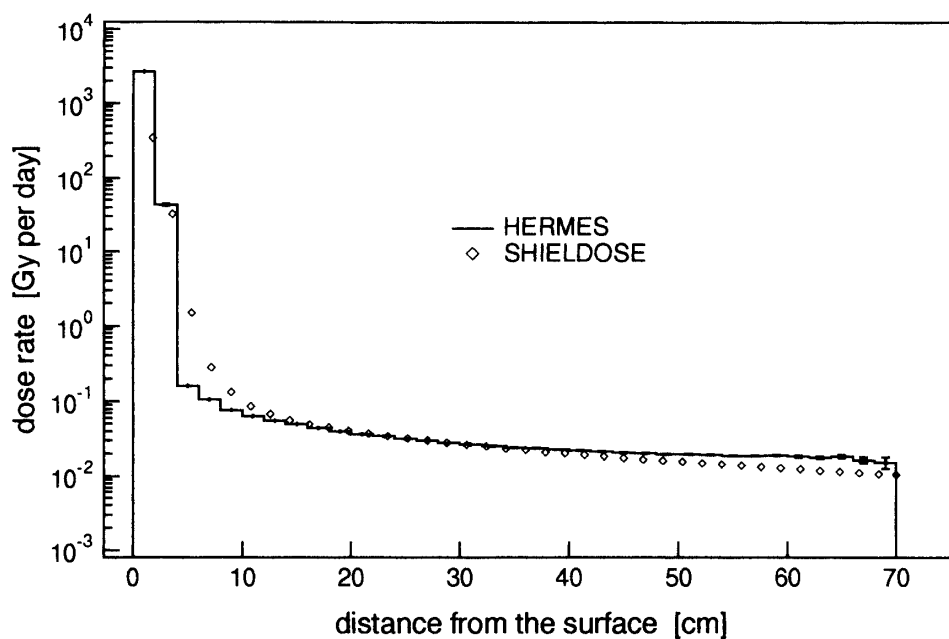
#### 4. 結 論

「あけぼの」に搭載された検出器により、陽子、電子並びに  $\alpha$  粒子の宇宙空間での強度分布を測定できた。陽子、電子は磁気赤道上の地球中心からの高度約 1.7 地球半径に強度分布のピークがあり、NASA の放射線帯モデルと比較すると、ほぼ一致している。しかし、絶対値は陽子に関してはエネルギー範囲 6.4~15 MeV では測定値がモデル値より約 2 倍、電子に関してはエネルギー範囲 0.25~0.7 MeV で測定値が約 1/10 倍になっている。また、エネルギースペクトルを見ると、陽子、電子ともに測定値がモデルから得られたスペクトルと比較して硬くなっている。 $\alpha$  粒子に関しては電子、陽子の様な放射線帯モデルがないが、粒子強度のピークは磁気赤道上方約 1.7 地球半径にあり、値は陽子の約 1/100 倍になっている。

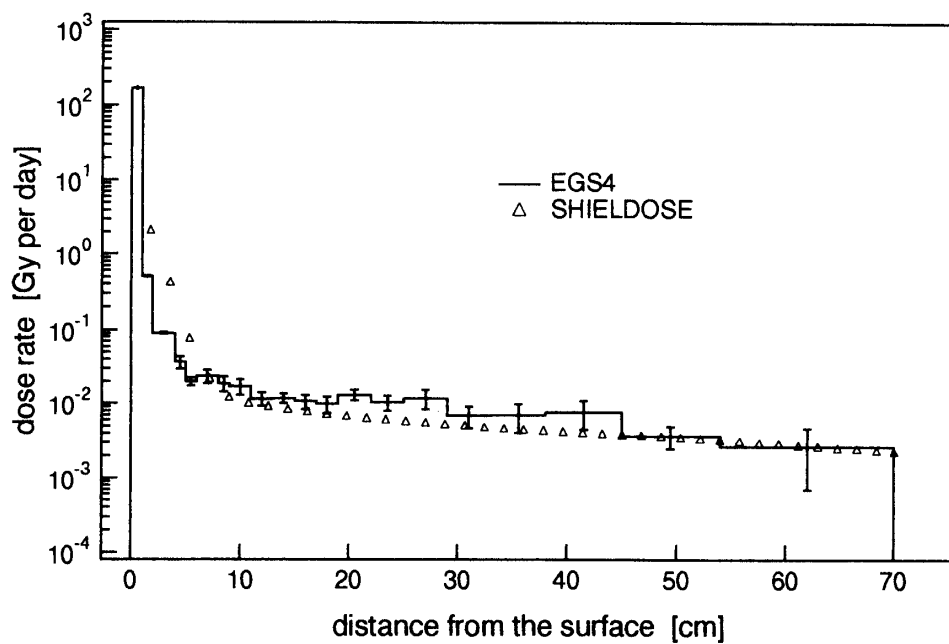
SEU は、「あけぼの」打ち上げ以来数多く発生しており、放射線帯粒子、主に陽子の粒子強度と強い相関がある。発生断面積について、実際の宇宙空間での測定値は加速器による地上実験による測定値と比較して約 1/10 になったが、これは、SEU 発生の主要原因である Si の (p, p $\alpha$ ) 反応に必要な陽子の強度を求めるため、NASA の放射線帯モデルから計算したスペクトルを測定した陽子の強度に規格化したための差異であると考えられる。

SEL に関しては、一度も発生しておらず、64 k-bits CMOS SRAM のウェルソース構造が SEL に対して有効であることが実際の宇宙空間で実証された。

トータルドーズ効果による MOS トランジスタのしきい電圧の変化は、打ち上げ後 600



(a) 陽子による吸収線量



(b) 電子による吸収線量

図 16 衛星を模擬した Al (密度  $0.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 均質球 (半径 70 cm) 中の吸収線量分布の計算結果

日 (1990 年 10 月 15 日) までで、p-channel の MOSFET は 0.11 V、n-channel の MOSFET は 0.07 V である。これらから推測されるトータルドーズ量は 40 Gy (Si) となる。

## 謝 辞

HPM、RIC の設計ならびに試験をそれぞれ担当していただいた立教大学の村上活之氏、元日本電信電話株式会社 LSI 研究所の坂川義満氏に感謝します。また、装置の製作にあたられた明星電気株式会社にお礼申し上げます。

本研究は「あけぼの」衛星に関係された数多くの方々の力添えによるもので、感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) D. M. Sawyer, J. I. Vette, *AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum*, NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, NASA/Goddard Space Flight Center, 1976
- 2) G. W. Singley, J. I. Vette, *The AE-4 Model of the Outer Radiation Zone Electron Environment*, NSSDC/WDC-A-R&S 72-06, NASA/Goddard Space Flight Center, 1972
- 3) M. J. Teague, J. I. Vette, *The Inner Zone Electron Model AE-5*, NSSDC/WDC-A-R&S 72-10, NASA/Goddard Space Flight Center, 1972
- 4) M. J. Teague, J. I. Vette, *AE-6 : A Model Environment of Trapped Electrons for Solar Maximum*, NSSDC/WDC-A-R&S 76-04, NASA/Goddard Space Flight Center, 1976
- 5) EXOS-D 中間報告書、文部省宇宙科学研究所、1988
- 6) J. F. Ziegler, J. P. Biersack, U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids*, Pergamon Press, 1985
- 7) Nicholas Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, McGraw-Hill Book Company, 1983
- 8) P. Cloth, D. Filges, R. D. Neef, G. Sterzenbach, et al., *HERMES : A Monte Carlo Program System for Beam-Materials Interaction Studies*, Institut für Reaktorentwicklung, 1988
- 9) W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers, *The EGS4 Code System*, SLAC-265, 1985
- 10) N. Shiono, Y. Sakagawa, et al., *Single Event Effects in High Density CMOS SRAMs*, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-33, no. 6, pp. 1632-1636, 1986
- 11) 塩野登 (日本電信電話株式会社 LSI 研究所)、私信
- 12) L. C. Simonsen, F. A. Cucinotta, W. Atwell, J. E. Nealy, *Time Analysis of the October 1989 Proton Flare Using Computerized Anatomical Models*, Proceedings of the Topical Meeting on New Horizons in Radiation Protection and Shielding, American Nuclear Society, 1992
- 13) M. J. Teague, J. I. Vette, *The Use of The Inner Zone Electron Model AE-5 And Associated Computer Programs*, NSSDC 72-11, NASA/Goddard Space Flight Center, 1972 (Appendix)
- 14) E. L. Petersen, *Nuclear Reaction in Semiconductors*, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-27, no. 6, pp. 1494-1499, 1980
- 15) 宇宙用半導体素子・材料の耐放射線性研究動向の調査報告書、社団法人大阪ニュークリアサイエンス協会、1989
- 16) Stephan Seltzer, *SHIELDOSE : A Computer Code for Space-Shielding Radiation Dose Calcula-*

tions, NBS Technical Note 1116, 1980