

GMS-3/4太陽電池発生電流の正規化プログラムによる データの抽出及び考察について

Process and consideration of solar panel current of GMS-3/4 using solar panel current regularization program.

西田 淑博*¹, 大橋 勇治*², 関根 和夫*¹
Toshihiro Nishida Yuji Ohashi Kazuo Sekine

Abstract

There has been the considerable downslide which is due to large scale solar flare in the solar panel current of GMS-3/4 since 1989.

This report describes some case of the considerable downslide in the solar panel current of GMS-3/4.

1. はじめに

衛星のバス及びミッション機器の電力は、太陽電池によりまかなわれている（日食中はバッテリーから供給される）。

スピン衛星である GMS の太陽電池は衛星の側面に貼りつけられており、宇宙空間における種々の要因（荷電粒子・放射線・温度等）によって、その発生電力は影響を受ける。

種々の要因のなかでも、最も大きな影響を及ぼすものと考えられている太陽からの荷電粒子・放射線等は、太陽活動に依存するものであるが、最近の太陽活動は第22活動極大期と呼ばれる活動期に入っており、この太陽活動によって飛来する荷電粒子によるものと考えられる太陽電池発生電流の急激な低下が GMS-3/4 でも観測されている。

また、このような急激な低下が観測されない場合でも、太陽電池は前述の種々の要因による経年劣化を伴い、徐々にその発生電流は低下していく。

一般に、太陽電池によって発生する電流は、太陽からの受光量に依存しているため、『図-1』に示すように太陽照射角度・太陽-衛星間距離等の影響を受け季節変化をする。

季節変化を含めた実際の発生電流は『図-1』でも確認できるが、季節変化の中に埋もれてしまうような低下や経年劣化は確認しづらい。

また、低下や劣化の程度が一目瞭然でわかるように

することも、衛星の追跡管制を行っていくうえで大切なことと考える。

以上の考えに基づいて作成した正規化プログラムによって得られた、GMS-3/4の太陽電池発生電流をもとに、GMS-3/4で観測された荷電粒子との関係も含めて以降に記述する。

2. 正規化プログラムで考慮した要素

1項で述べた考え方により、以下に記述する計算式及び要素により正規化プログラムの作成を行った。但し、太陽電池発生電流（電力）の正規化プログラムは、各方面でも作成されている。

・計算式

$$I = i \times r \times \sin \theta$$

I : 正規化された太陽電池発生電流 (A)

i : 太陽電池発生電流 (実測値) の1日の
平均値 (A)

r : 00UTにおける太陽-衛星間距離 (AU)

θ : 太陽-衛星間スピン軸角の1日の
平均値 (DEG)

・要素

(1) i : 太陽電池発生電流 (実測値) の1日の
平均値

以下の3項目に分けて求める。

① 通常時

食・バッテリーリコンディショニング・バッテリーのハイレート充電等のイベントが行われ

* 1 気象衛星センター管制課

* 2 札幌管区気象台調査課

ていない通常時は、太陽電池発生電流の1日の平均値を求める。

② 食及びバッテリーのハイレート充電時

該当する時間帯の全データを除いて1日の平均値を求める。

③ バッテリリコンディショニング期間

当該期間中は、太陽電池発生電流がトリクル充電分だけ高くあらわれるので、その分を差し引いて1日の平均値を求める。

(2) r : 00UTにおける太陽-衛星間距離

太陽-衛星間距離=太陽-地球間距離として近似し次式で求める。

$$r = (1 - Es^2) / (1 + Escos\Theta_s)$$

Es : 離心率 (DEG)

Θ_s : 真近点離角 (RAD)

但し、

$$Es = 1.675104E^{-2} - 1.1444E^{-5} \cdot D - 9.4E^{-9} \cdot D^2$$

$$D = d/10000$$

$$d = J \cdot D(\text{julian data}) - 2415020$$

$$\Theta_s = \Theta_1 + 2Es\sin\Theta_1 + 1.25Es^2\sin 2\Theta_1 - (Es^3/4)\sin\Theta_1 + (13/12)Es^3\sin 3\Theta_1$$

$$\Theta_1 = \Pi(L-P)/180$$

$$L = 279.696678 + 0.9856473354d + 2.267E^{-5} \cdot D^2$$

$$P = 281.220844 + 4.70684E^{-5} \cdot d + 3.39E \cdot D^{-5} + 7E^{-8} \cdot D^3$$

(3) Θ : 太陽-衛星スピン軸角の1日の平均値

太陽-衛星スピン軸角を次式により求める。

$$\cot\Theta = \cot H \times \sin \{(M - M_2) - Ms\}$$

但し、

H : サンセンサ1のスピン軸角に対する傾斜角

(ノミナル35°)

$M - M_2$: (サンセンサ1-サンセンサ2)から生ずるパルス角度

Ms : サンセンサ2のサンセンサ1からの回転角

(ノミナル35°)

3. GMS-3/4のSEMデータについて

1項でも述べたが、太陽電池に影響を及ぼす種々の要因のなかで、最も大きなものと考えられている太陽からの荷電粒子は、GMS-3/4にも搭載されている検出器により、『表-1』に示すような、電子・プロトン・アルファ各粒子のエネルギーを測定している。

1991年3月のGMS-4 SEMデータのプロット図をサンプルグラフとして『図3-2』に示す。

図中の矢印で示したように、3月23日に発生した大きな太陽フレアに伴い、電子・プロトン・アルファ各粒子が、急峻な立ち上がりとともに、急激な増加を示している。

特に、太陽の静穏時にはあまり見られない高エネルギーレベルのプロトン5・6・7及びアルファ粒子の増加が観測されている。

この3月23日のSEMデータの増加現象が観測された同時期に、『図3-1』に示したような、GMS-4の太陽電池発生電流の急激な低下(図中の*1で示す)

DETECTOR OF GMS/3-4	OBSERVATION PARTICLE (MEASUREMENT SPHERE OF ENERGY :Mev)	
DETECTOR 1	PROTON 1(1~ 4) PROTON 2(4~ 8)	ALPHA 1(8~ 70)
DETECTOR 2	PROTON 3(8~ 15)	ALPHA 2(30~ 70)
DETECTOR 3	ELECTRON (≥ 2)	PROTON 4(15~ 36) ALPHA 3(60~148)
DETECTOR 4	PROTON 5(36~ 80)	ALPHA 4(148~244)
DETECTOR 5	PROTON 6(80~200) PROTON 7(200~500)	ALPHA 5(325~390)

TABLE. 1 CORRESPONDENCE OF DETECTOR TO OBSERVATION PARTICLE WHERE : PROTON 7 IS GMS-4 ONLY.

が観測されており、この関係からも太陽フレアによって飛来する荷電粒子が太陽電池発生電流に影響を及ぼしていることがわかる。

4. 正規化プログラムにより得られたデータ

以降、GMS-3とGMS-4の具体例を挙げるが、GMS-3とGMS-4はミッション運用期間が異なるため、同一期間による比較はしていない。

(1) 出力データ

GMS-3 太陽電池発生電流の1987年9月1日から1989年12月3日における正規化データのプロット図を『図2-1』に示す。

(2) 考察

ア GMS-3 太陽電池発生電流の正規化データ

(ア) 1989年8月から10月にかけて発生した大きな太陽フレアによる低下

『図2-1』の※1で示した部分において、3回の急激な発生電流の低下が見られる。この期間のSEMデータのプロット図を『図2-2』から『図2-4』に示す。(但し、GMS-3搭載のSEM検出器の測定粒子はプロトンについては1から6までであるが、プロトン6を検出する検出器5にノイズがのり、正確な測定値を確認できなくなったため、プロット図上から削除している。)

3項でも述べたとおり、図中の矢印で示したように1991年3月に発生した太陽フレアの時と同様に、SEMデータの値は太陽フレア発生以前の値に比べて、急峻な立ち上がりとともに急激な増加を示しており、その後も1週間程度SEMデータに増加傾向が見られる。

この急峻な立ち上がりから1週間程度続いたSEMデータの増加した同時期に、GMS-3の太陽電池発生電流も低下しており、太陽フレアによって飛来した電子・プロトン・アルファ各粒子(特に高いプロトン・アルファ粒子)による影響を受けたことがわかる。

この期間の太陽電池発生電流は、低下が始まる直前の発生電流に比べて0.58(A)・5.4(%)程度低下している。

これは、後述するがGMS-3の1988年から1989年における経年劣化分の3年から3.5年分に相当する低下である。

(イ) 経年劣化

GMS-3の経年劣化を『図-2』の※2から※4に示す。

1988年1月1日・4月1日・7月1日の各発生電流値と、1989年の同月日の発生電流値を比較し、その差をGMS-3の経年劣化分とした。それぞれ、0.16(A)・0.20(A)・0.19(A)であり、1989年の8月から10月にかけて発生した3回の大きな太陽フレアによる急激な発生電流の低下以前の経年劣化分は0.16(A)から0.20(A)・1.4(%)から1.7(%)程度である。

イ GMS-4 太陽電池発生電流の正規化データ

(イ) 1991年3月に発生した大きな太陽フレアによる低下

『図3-1』の※1で示した部分において、急激な発生電流の低下が見られる。

この期間のSEMデータのプロット図を『図3-2』に示す。

この期間の太陽電池発生電流は、低下が始まる直前の発生電流に比べて0.21(A)・1.8(%)程度低下している。

この低下は、1991年3月の低下以前の経年劣化分の2.5年から4年分に相当する値である。

但し、後述するがGMS-4の経年劣化分はGMS-3に比べて少ない。

また、経年劣化分を算出した期間の諸条件が違ってもあり、単純にGMS-3とGMS-4の経年劣化分に相当する年数を比較した議論はできない。

(イ) 経年劣化

GMS-4の経年劣化分を『図3-1』の※2から※4に示す。

GMS-4が実運用を開始したのは1989年12月であり、前述した1991年3月の太陽フレアによる低下以前のデータで比較しようとする、比較のポイント間隔(月日)が短くなってしまいが、1990年1月1日・2月1日・3月1日の各発生電流値と、1991年の同月日の各発生電流値を比較し、その差をGMS-4の経年劣化分とした。

それぞれ0.05(A)・0.08(A)・0.06(A)であり、1991年3月の太陽フレアによる急激な発生電流の低下以前の経年劣化分は0.05(A)から0.08(A)・0.4(%)から0.7(%)程度である。

GMS-4の経年劣化分がGMS-3の経年劣

化分に比べて少ない。

これは、GMS-3の経年劣化分が1989年8月から10月の太陽電池発生電流の低下が観測される以前のデータであり、GMS-4の経年劣化分は同時期の発生電流の低下が観測された後のデータであることがポイントになると考える。

よって、以下のような理由によるものではないかと考えている。

衛星の太陽電池セルの劣化度は、荷電粒子による被爆量に比例すると言われている。

これは、荷電粒子による被爆により太陽電池セルのシリコン電子が格子点からはじき出される現象が発生し、はじき出された原子及び原子空孔により、セルに欠陥が形成されるためであると言われている。

すなわち、被爆量が多くなるほどセルの欠陥が多くなり、起電力の低下(劣化)をもたらすということである。

GMS-4は1989年9月の打ち上げのため、前述したように大きな太陽フレアによる影響を打ち上げ直後に受けたわけであるが、このように初期段階で荷電粒子による大きな被爆を受けた場合、セルの欠陥が通常時よりも充分多く形成されてしまうため、経年劣化に影響を及ぼす程度の要因(荷電粒子・放射線等)では、新たなセルの欠陥形成の進行が遅くなるのではないかと考える。

この点については、今後のGMS-4の経年劣化について見守り、データの蓄積を行っていくつもりである。

5. まとめ

我々の目的は『図-1』で示した太陽電池発生電流の季節変化を、2項で述べた要素を考慮して正規化し、一目瞭然に発生電流の低下を確認することであった。しかし、『図2-1』及び『図3-1』を見てもわかるとおり、実際にはまだ若干の季節変化と思われる波が見られる。

さらにその中でも小さな変化をしており、完全な正規化グラフとはなっていない。

これは、

- ・温度変化による太陽電池セルの変換効率の違い
- ・テレメトリの精度による誤差
- ・バス電圧の変動に対するメインアレイ・充電アレ

イの電流・電圧特性を考慮していない。

等のが要因として考えられる。

我々の作成したプログラムではこれらの要因に対する考慮はしておらず、低下率を求めるための誤差要因となっていることは否めない。

しかし現在のところ我々は、前述した誤差要因を求めるためのデータを持っていない。また、多少の誤差は否定できないものの、低下分としてはある程度の中をもつことになるが、その値を確認できたことから一応の成果が得られたと考えている。

今後は、当正規化データの誤差要因を取り除くための資料の収集、及びフライトデータの蓄積を行い、SEMデータと太陽電池発生電流の低下現象との相関を更に検討していきたいと考えている。

参考文献

1. SOLAR CELL ARRAY DESIGN HANDBOOK.
H.S. RAUSCHENBACH
VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY
2. 宇宙開発事業団技術成果発表 前刷集(第1回)
1985年
宇宙開発事業団
3. SEM研究会報告 (1) 1978年
(2) 1980年
(3) 1981年
(4) 1983年
理化学研究所宇宙線研究室

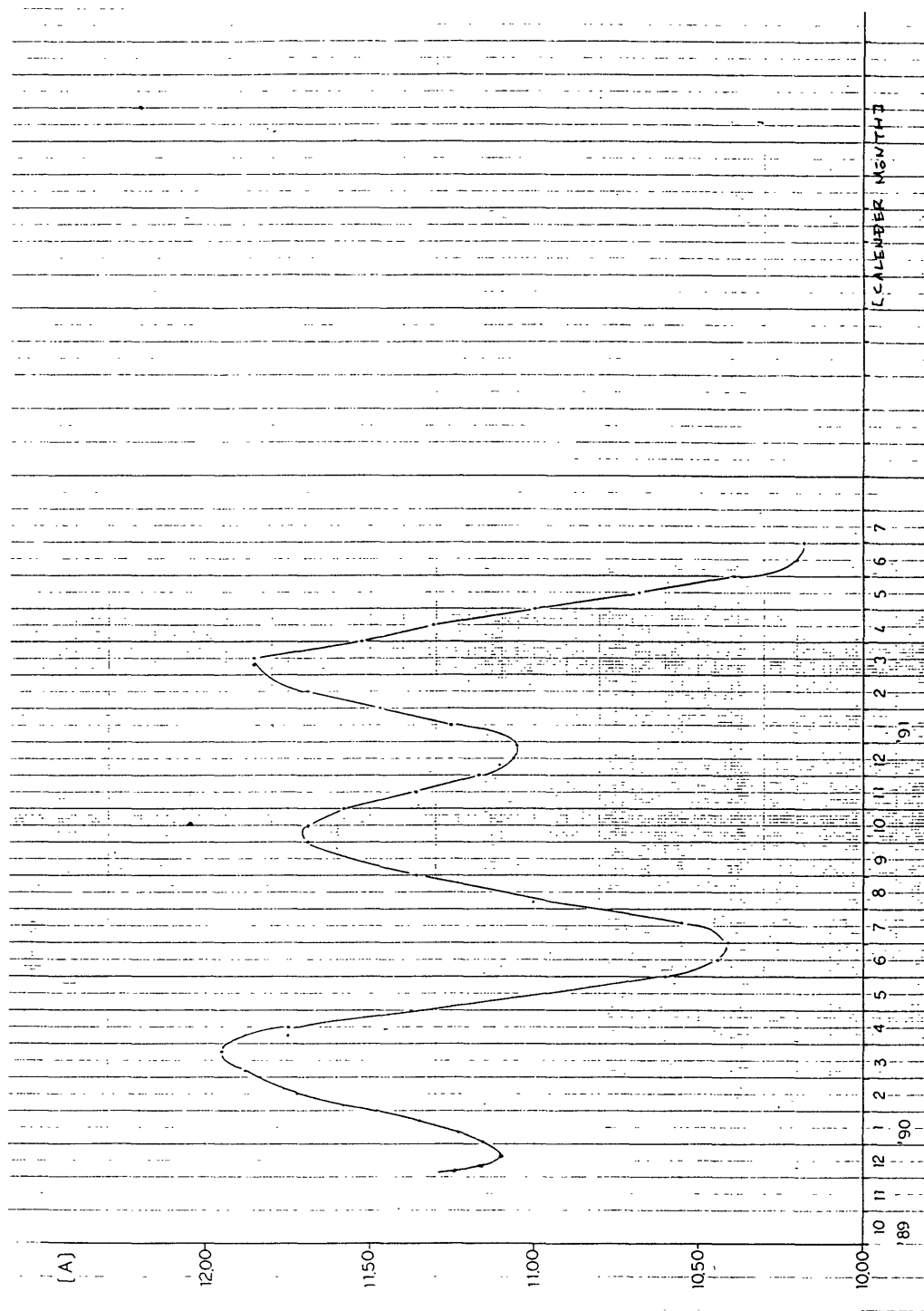


Fig. 1 A SECULAR CHANGE OF GAS-4 SOLAR PANEL CURRENT FROM 1989 TO 1991

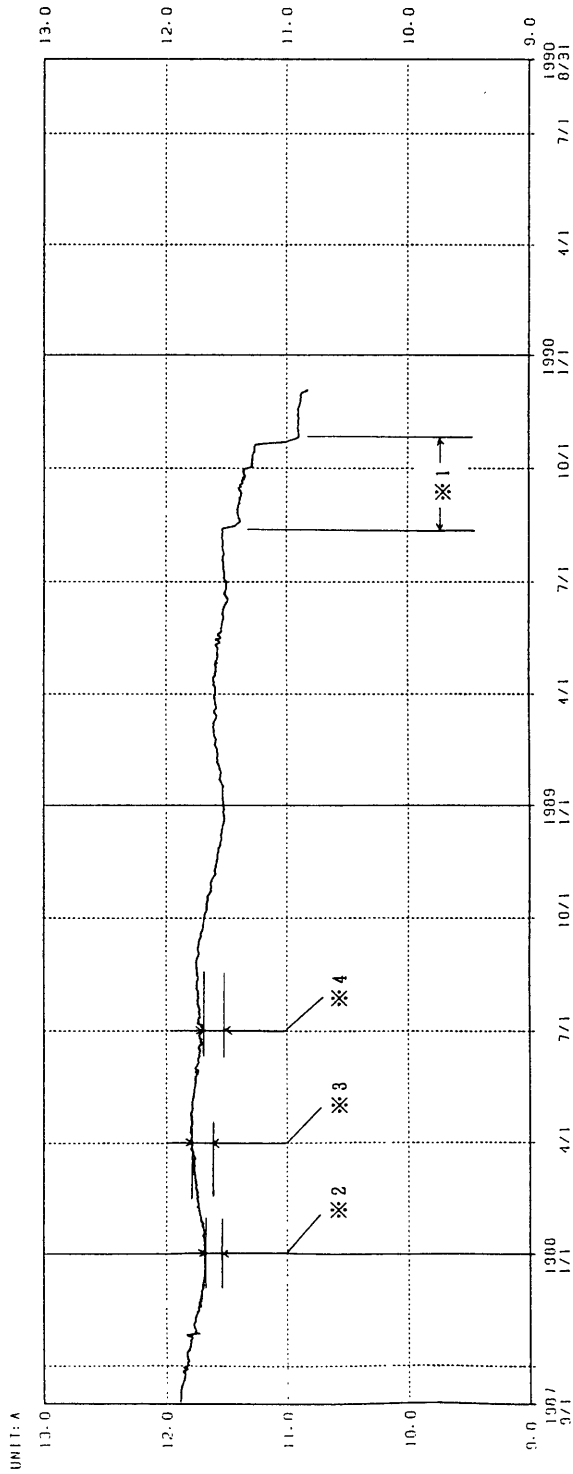


Fig. 2-1 REGULARIZATION DATA OF GMS-3 SOLAR PANEL CURRENT

GMS-3/SEM 1-HOUR-AVERAGES

PROTONS P1: 0.8- 4.0MEV P2: 4.0- 8.0MEV P3: 8.0- 16. MEV
 P4: 16. - 30. MEV P5: 30. - 68. MEV P6: 68. -100. MEV
 ALPHAS A1: 8. - 66. MEV A2: 32. - 66. MEV A3: 64. -120. MEV
 A4: 120. -240. MEV A5: 270. -370. MEV
 ELECTRONS EL: > 2.0MEV

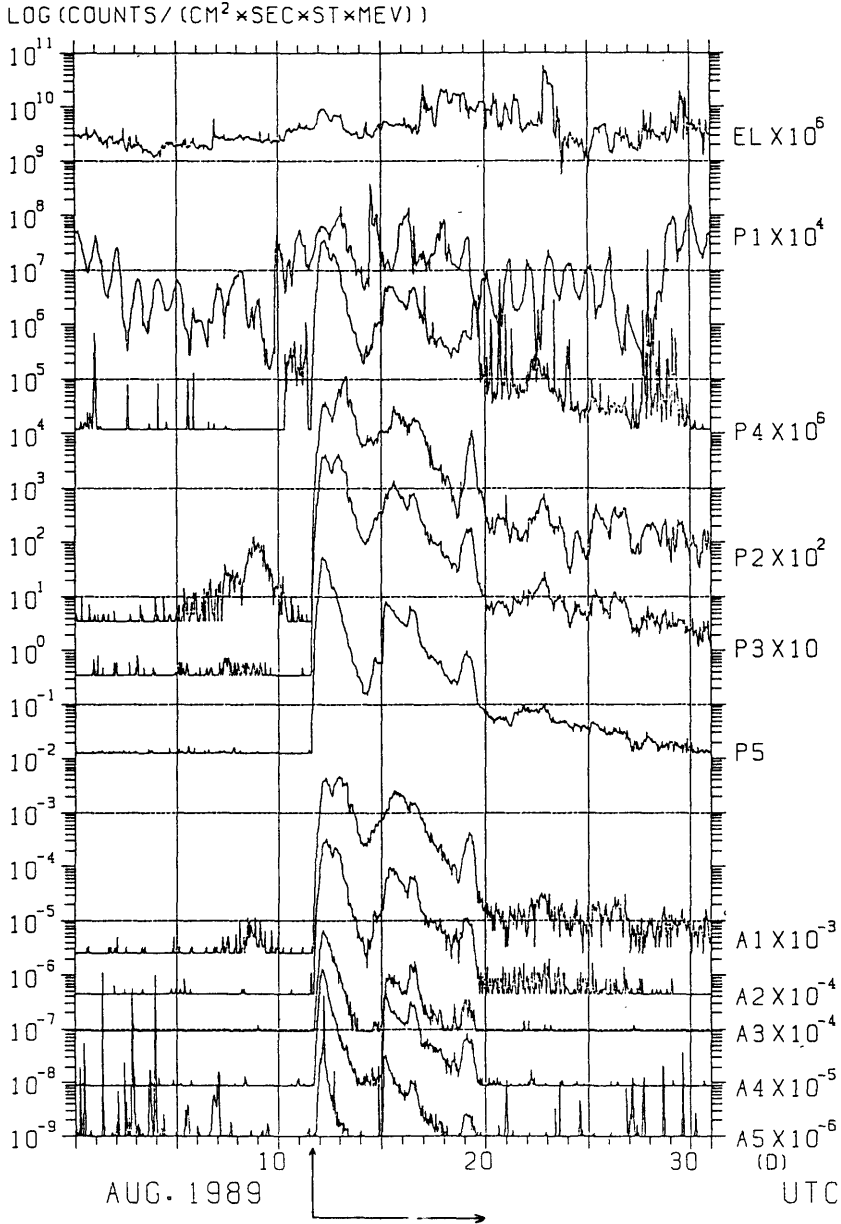


Fig. 2-2 SEM OBSERVATION DATA OF GMS-3(AUG. 1989)

GMS-3/SEM 1-HOUR. AVERAGES

PROTONS	P1: 0.8 - 4.0 MEV	P2: 4.0 - 8.0 MEV	P3: 8.0 - 16. MEV
	P4: 16. - 30. MEV	P5: 30. - 68. MEV	P6: 68. - 100. MEV
ALPHAS	A1: 8. - 66. MEV	A2: 32. - 66. MEV	A3: 64. - 120. MEV
	A4: 120. - 240. MEV	A5: 270. - 370. MEV	
ELECTRONS	EL: > 2.0 MEV		

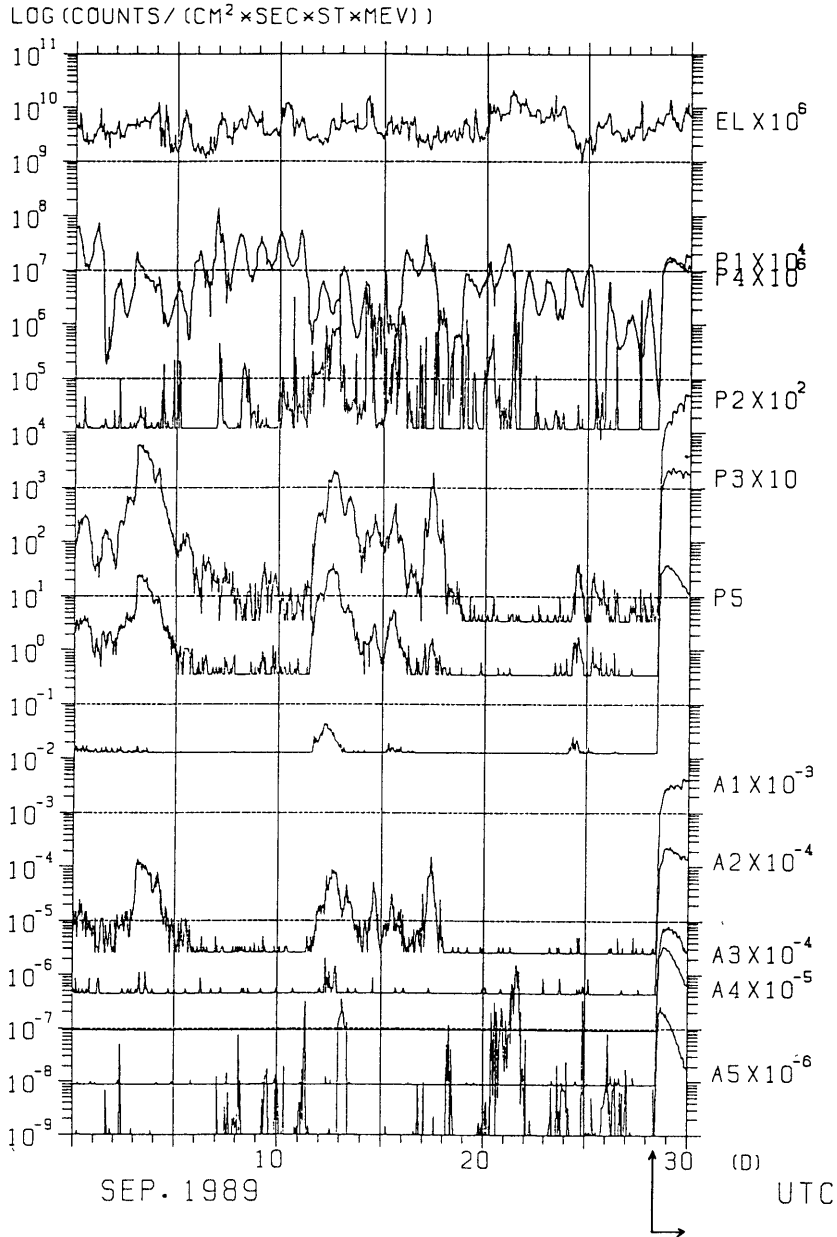


Fig. 2-3 SEM OBSERVATION DATA OF GMS-3 (SEP. 1989)

GMS-3/SEM 1-HOUR AVERAGES

PROTONS	P1: 0.8- 4.0MEV	P2: 4.0- 8.0MEV	P3: 8.0- 16. MEV
	P4: 16. - 30. MEV	P5: 30. - 68. MEV	P6: 68. -100. MEV
ALPHAS	A1: 8. - 66. MEV	A2: 32. - 66. MEV	A3: 64. -120. MEV
	A4: 120. -240. MEV	A5: 270. -370. MEV	
ELECTRONS	EL: > 2.0MEV		

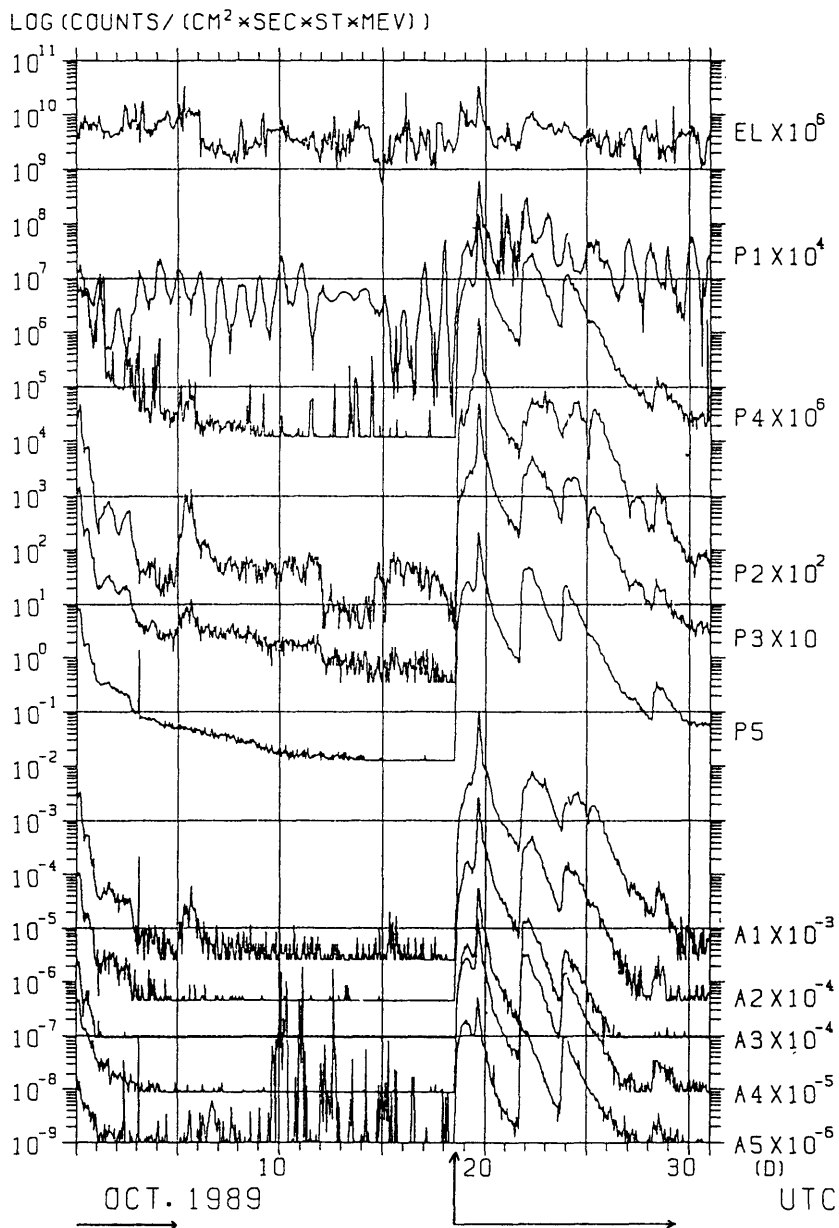


Fig. 2-4 SEM OBSERVATION DATA OF GMS-3 (OCT. 1989)

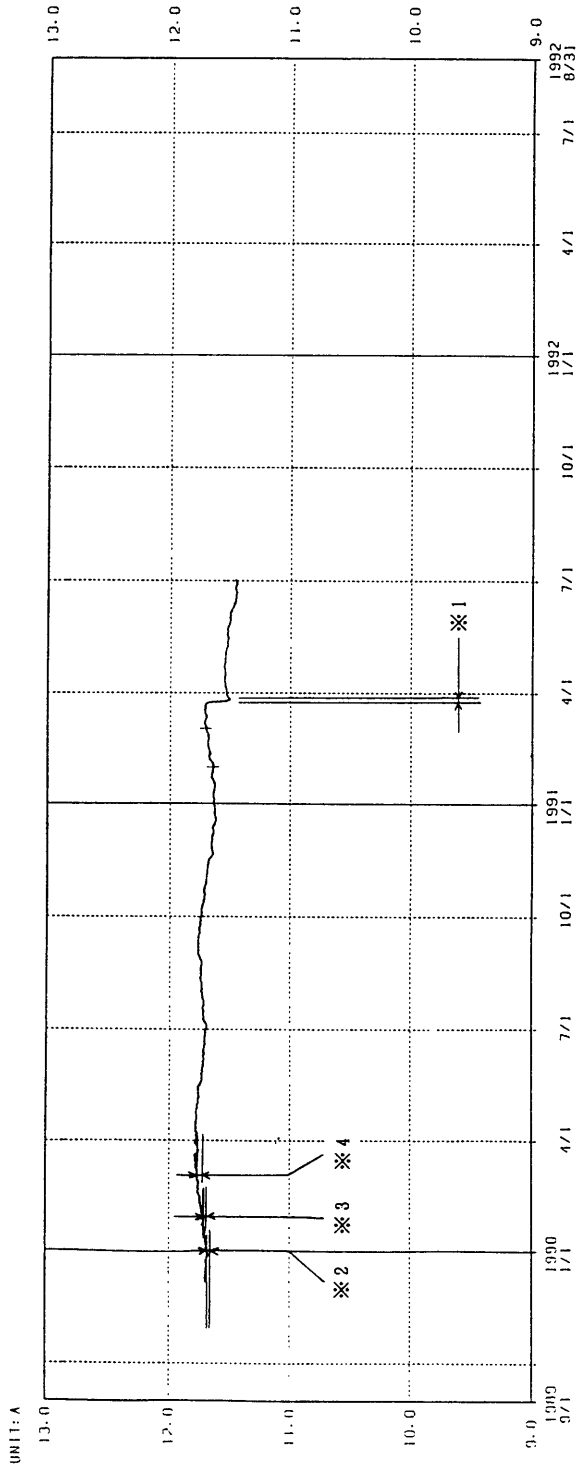


Fig. 3-1 REGULARIZATION DATA OF GMS-4 SOLAR PANEL CURRENT

GMS-4/SEM 1-HOUR. AVERAGES

PROTONS P1: 1.0- 4.0MEV P2: 4.0- 8.0MEV P3: 8.0- 15. MEV
 P4: 15. - 36. MEV P5: 36. - 80. MEV P6: 80.-200. MEV
 P7: 200. -500. MEV
 ALPHAS A1: 8. - 70. MEV A2: 30. - 70. MEV A3: 60. -148. MEV
 A4: 148. -244. MEV A5: 325. -390. MEV
 ELECTRONS EL: > 2.0MEV

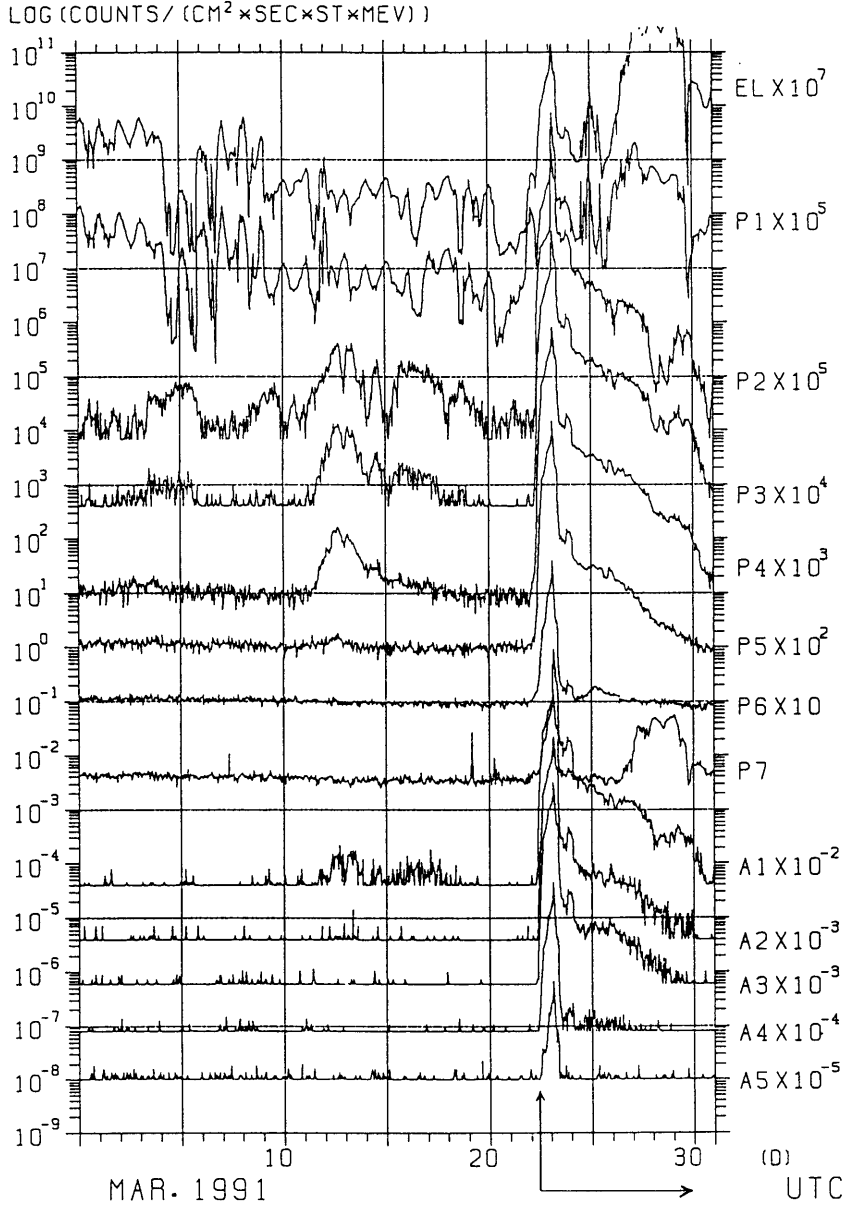


Fig. 3-2 SEM OBSERVATION DATA OF GMS-4 (MAR. 1991)