

「じきけん」搭載の 太陽電池特性計測装置と放射線劣化特性

高橋 慶治・河端 征彦・後川 昭雄
折井 武*・富田 秀穂*・村中 昇*・原 宏徳*

1. 序

昭和53年9月16日に鹿児島宇宙空間観測所(KSC)から打上げられた第6号科学衛星「じきけん」には、主として地球磁気圏のバンアレン帯における太陽電池の出力劣化を調べるために、太陽電池特性計測装置(SCM)が搭載されている。

SCMの太陽電池は、各種カバーガラス付き1cm×1cmのn/p形素子6枚で、衛星表面のSCM専用パネル上に実装されている。

SCMによる太陽電池のI-V(電流-電圧)特性の測定は、打上げ2日後の第5周から初期測定が行われ、SCM動作が正常であることの確認がなされた。その後、60mアンテナ伸展後、衛星スピンのSCM測定に適するまでになった第32周目より本格的測定に移り、54年4月25日には第628周に達した。

以下では、第622周までに得られた飛しょうデータの内、短絡電流と最大電力について行った検討結果を報告する。

2. 放射線環境

宇宙放射線の環境は宇宙線、電磁放射、バンアレン帯放射線、オーロラ粒子および太陽フレア粒子から構成されている。この内ここでは、「じきけん」の軌道から見てその影響が著しいバンアレン帯放射線を主に取りあげることにする。

地球のダイポール磁界は、地球付近に放射線帯が存在する原因であり、長期間捕捉荷電粒子を保持している。放射線帯は不均一磁界に閉じ込められたいわゆるプラズマであり、その移動、消滅および捕捉機構の理解は最近かなり改善されてきた。このような放射線環境のダイナミックスは太陽活動に大きく影響される。

地球磁界に捕捉された放射線は、その起源が自然発生的か高空核爆発(1962年7月のStarfish計画)のような人工的かのいずれかである。ある粒子が地球磁界に捕えられるためには電荷が必要で、この場合の構成要素が電子とプロトンというわけである。起源の如何にかかわらず、ちょうど適切な運動量とピッチ角(粒子の速度が磁界となす角)を持った粒子が、磁界に捕えられる。その後不均一磁界の中で、ピッチ角と曲率を変えながら磁力線の

* 日本電気株式会社

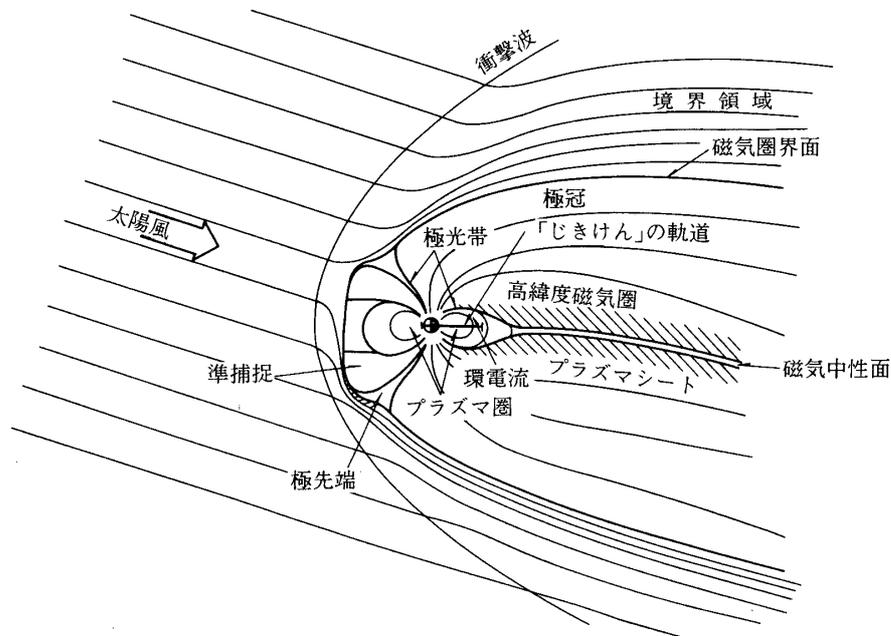
まわりをらせん運動する。粒子はピッチ角が 90° になるミラー（即ち反射）点に達するまでこのような運動を続け、その後はね返って他の半球に移る。南北のミラー点を往来すると同時に、磁界の勾配と磁力線の曲率による力（いわゆる遠心力）のため、経度方向にもドリフトする。それゆえ正常な太陽活動期に捕捉粒子は、次の三種の周期運動によって特徴づけられる。

- a) ラーマ周波数を持った磁力線のまわりのサイクロトロン振動
- b) 南北のミラー点の間の緯度方向運動
- c) 経度方向のドリフト

電子の運動方向はその電荷がプロトンの電荷と反対極性のため、プロトンの運動方向とは逆である。ミラー点の付近では、粒子は上層大気の気体と衝突し、それらが下層大気中に消滅するまで徐々にエネルギーを失い、その軌道を変えて行く。

地球から少し離れた所で、磁場は図1に示すように太陽風によって歪んでいる。太陽風は太陽からやってくるプラズマで、多くは数 KeV の平均エネルギーと 10cm^{-3} のオーダーの密度を持ったプロトンである。これは地球磁界と相互作用をして衝撃波を形成する。太陽プラズマが衝撃波面を通過するとき、粒子のランダムな速さは増加し、磁界が乱される。地球と太陽を結ぶ線近くの昼側では熱いプラズマ領域がある。太陽風は地球磁界を変形させて、それを磁気圏と呼ばれる空洞に押し込めてしまう。境界領域は $10\sim 14\text{Re}$ （Re は地球半径で $6,300\text{ km}$ ）の範囲にある。

境界領域のすぐ後の地球磁界は簡単なダイポールモデルに関連したものと定性的には同様



第1図 地球の正午と真夜中を結ぶ子午面で見えた磁気圏領域

で、前述の粒子放射線を捕捉する [1] .

「じきけん」は、図1にも示したように近地点が227 km、遠地点が30,065 kmで、軌道傾斜角が約31度の長だ円軌道上を飛しょうしているため、バンアレン帯の中心付近を通過し、高エネルギープラズマ領域にも達するので、500 km付近を飛しょうする衛星（第4号科学衛星「はくちょう」、今後打上げ予定のMS-T4、ASTRO-A, Bなど）に比較して極めて大きな放射線による出力劣化を受けることが予想される。

太陽電池出力劣化に影響を及ぼすのは、主としてプロトンと電子であるので、次にこれらの放射線環境について述べる。

まず、プロトンについては、中エネルギーのプロトン粒子は、 $L = 4 Re$ 以内に集中していて、 $L = 2 Re$ の付近がピークである。ここで L は Re を単位として計った地球中心からの距離である。高エネルギーのプロトン粒子は $L = 1.5 Re$ をピークとして地球周辺に固まっているが、低エネルギーのプロトン粒子は静止軌道高度 ($L = 6.6 Re$) 近くまで広がっている。しかし、静止軌道高度では2 MeV以上のプロトン粒子はほとんど存在しない。

一方、数百KeVのエネルギーの電子は、 $L = 8 \sim 10 Re$ の磁気圏外まで広がっている。電子は大別して $L = 1.2 \sim 2.8 Re$ (ピークは $L = 1.4 Re$) の領域、 $L = 3 \sim 11 Re$ (ピークは $4 \sim 5 Re$) の領域に分かれて捕捉されている。

「じきけん」は $L = 1.04 Re$ から $5.8 Re$ の間を飛しょうするので、地球磁界により捕捉されている電子とプロトンのほぼ真中を通過し、極めて多量の放射線を受けることが予想される。

3. 太陽電池特性計測装置 (SCM)

太陽電池のI-V特性を自動的に取得する装置として、特性上の各点を等間隔で測定するものと、最大電力点付近をさらに細かく求めるもの [2] が考えられるが、この種の装置の積載は初めての経験であるので、気球での実績 [3] や重量、電力などを考慮して前者を採用した [4] .

3.1 SCMセンサ部

SCMセンサ部は、バータイプで大きさが $2 \times 2 \text{ cm}^2$ の n/p 形素子の $1/4$ の面積に相当する $1 \times 1 \text{ cm}^2$ の太陽電池6枚と、素子温度を計測するための白金センサ1個より成る。素子の構造は表1に示したが、 n^+/p 型のSC-1を除いて他は n^+/pp^+ 形で、いわゆるBSF (Back Surface Field)太陽電池というわけである [5] . これらの素子の配置を写真1に示す。

温度センサの出力は、太陽電池素子の特性を解析する際に、温度変化による効果を取り除くのに使われる。

各素子に正確な電圧を印加するため、各素子からの信号線を電圧用と電流用にわけて、合計4本の線が電子回路部に入るようになっている。

3.2 電子回路部

電子回路部のブロック・ダイアグラムを図2に、外観図を写真2にそれぞれ示す。太陽センサ (SAS) は写真3に示す「じきけん」の上下パネル面に各1個ずつの検出器を持って

表1. SCMパネルに実装した太陽電池

素子No.	太陽電池	カバーガラス
SC-1	「きょっこう」搭載用 n ⁺ /p 型素子	0.15mm 熔融石英
SC-2	「じきけん」搭載用 n ⁺ /pp ⁺ 型素子	0.15mm "
SC-3	"	0.3 mm "
SC-4	"	0.6 mm "
SC-5	"	0.15mm Ceria Glass
SC-6	"	0.3 mm Conductive Cover Glass

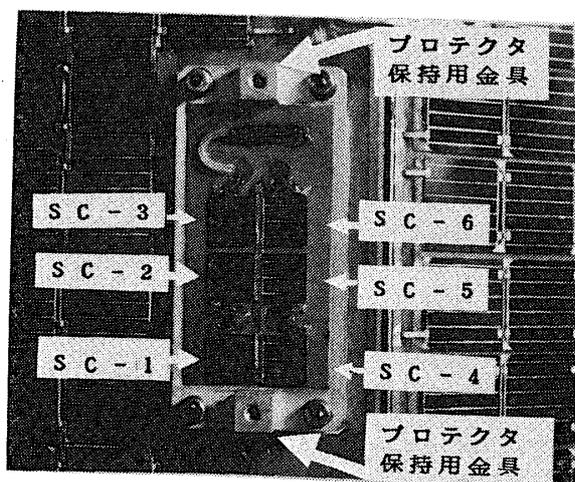


写真1. 「じきけん」のSCMパネル

いるが、衛星のスピンのにより、いずれかの視野（半値幅 = 1.5°）内に太陽光が入った時のSASからの出力信号により、SCMの各素子の計測を開始し、スピンによる入射光量の変化が無視し得る時間内（250 msec）に計測を完了する。29ステップの基準電圧を素子に印加した時の電流値は、電流計測用抵抗の両端電圧として読みとられ、A/D変換された後、素子指定1ワード（ID）、校正2ワード（FULL-CAL, O-CAL）と合せ、32ワードを1素子分のデータとしてDPU（Data Processing Unit）に転送する。IDワードの中の3ビットにより計測した素子の番号が示される。

FULL-CALはAMOで太陽光が素子に垂直入射した時の短絡電流に近い一定電流（34.8 mA）を電流計測用抵抗に流し、O-CAL（電流OFF）とともに、SCMデータの校正をするのに利用される。

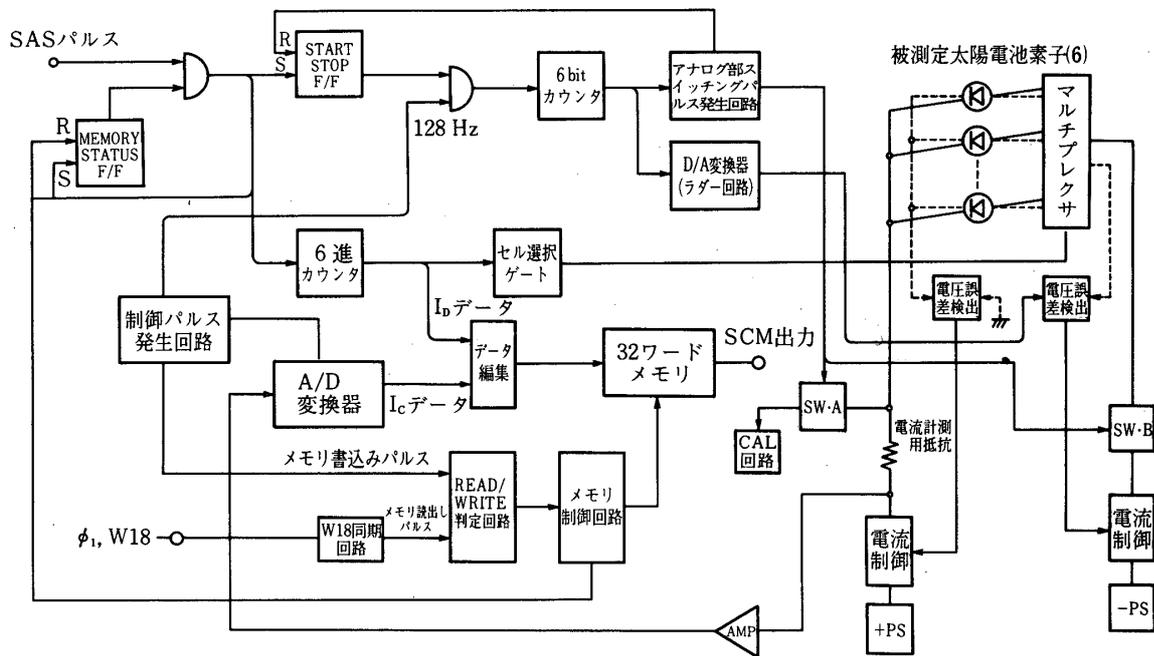


図2. SCM ブロック・ダイアグラム

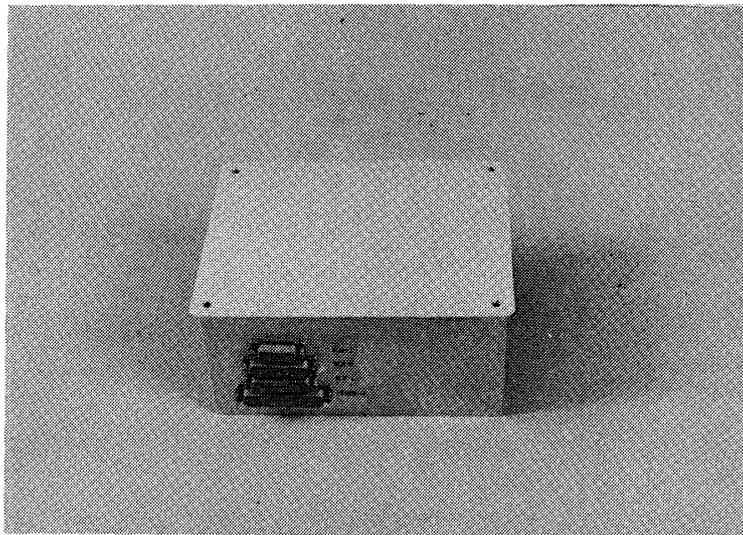


写真2. 太陽電池特性計測装置(電子回路部)の外観

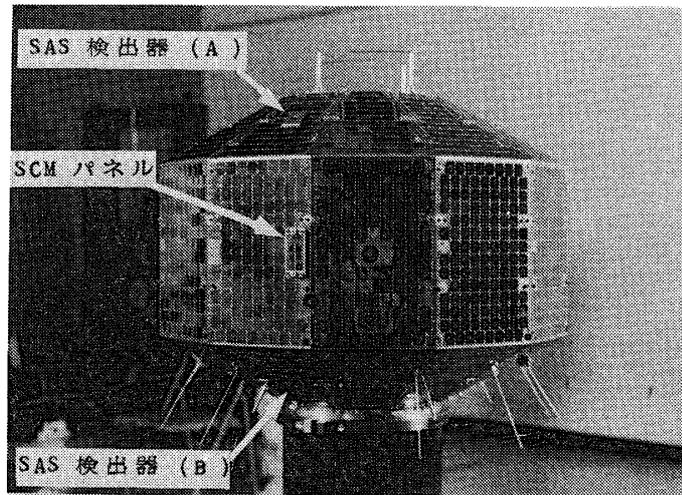


写真3. 第6号科学衛星「じきけん」

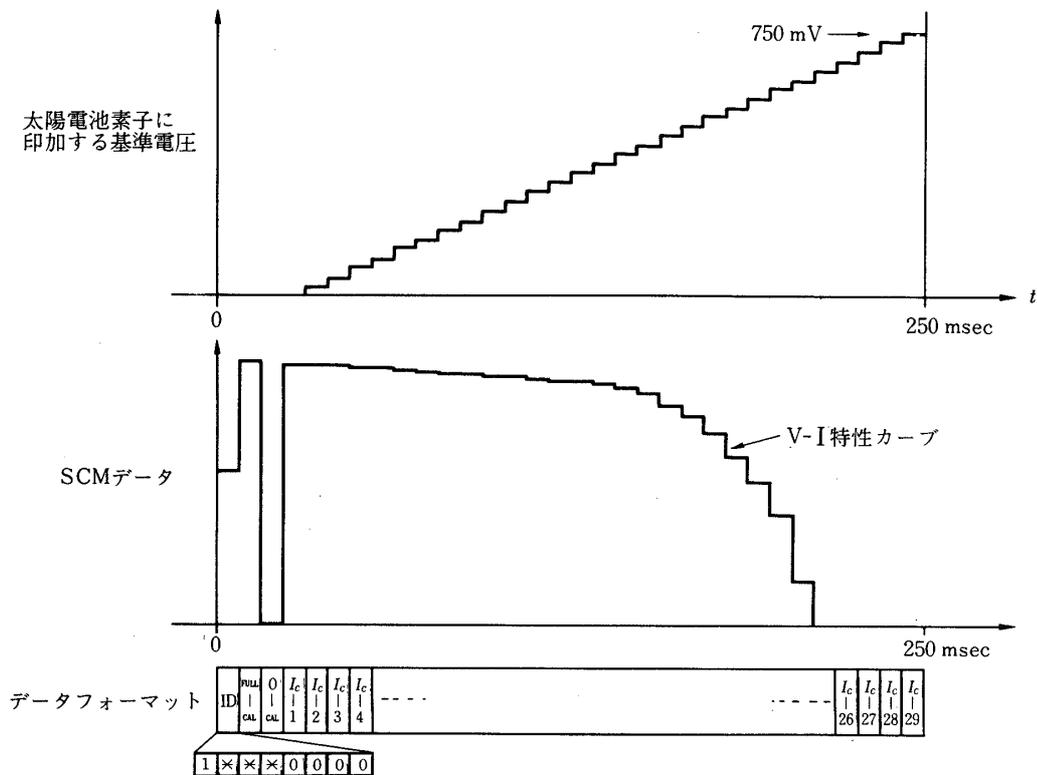


図3. 印加電圧, SCMデータ, データフォーマット

図3に、素子に印加する基準電圧と得られるデータのアナログ換算値の時間変化、およびデータフォーマットを示す。

DPUへのデータ転送は、 W_{18} と ϕ_1 を通して行われ、計測で得られる1素子分のデータ(32ワード)を転送し終わるのに32秒(DPU-High bit rate)または128秒(DPU-Low bit rate)の時間を必要とするため、SCM回路はA/D変換後のデータを格納しておくための32ワードメモリを持っている。

メモリ内容が完全にDPUに転送されるまで、SCM回路はBUSY状態にあり、この間にくるSASパルス(「じきけん」の予定スピンの速度では1パルス/120秒の割合でくる)は、rejectされる。DPUへのデータ転送が完了した時点ではready状態となり、SASパルスがきた時に次の素子のI-V特性の計測を開始する。

なお、消費電力の低減をはかるため、本装置ではデジタル部はすべてCMOS ICを使用している。

4. データ取得および処理

「じきけん」のKSCでのデータ取得は、おおむね図4に示す如く衛星からの電波を18mφアンテナもしくは10mφアンテナで追尾し、受信機により受信したのちデータ復調装置

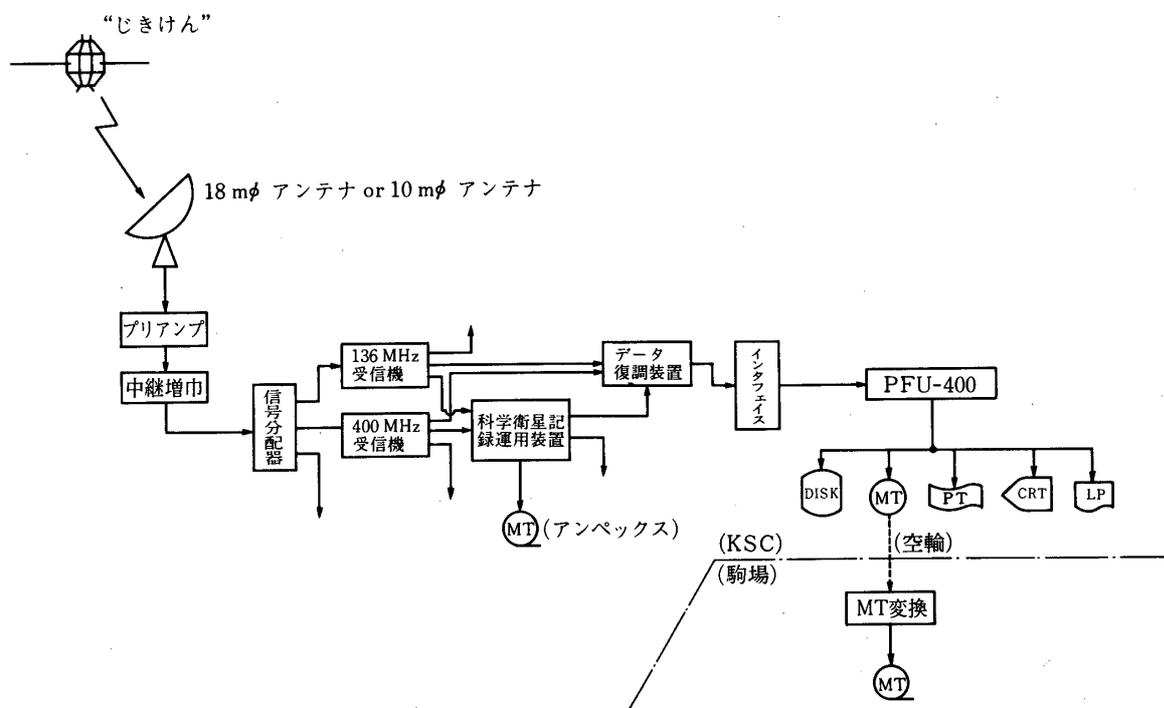


図4. KSCにおけるデータ取得系統図

置でPCMのビデオ信号を復調し、PCMコードをインタフェイス装置を介してミニコンピュータPFU-400に出力する。

PFU-400ではDRS (disk real-time system)によって第1次処理を行い、quick look としてテレビ画面(CRT)もしくはラインプリンタ(LP)などに処理結果を表示する。また、これと同時に処理結果を磁気テープ(MT)に退避し東京の駒場に輸送する。駒場では、さらにそれをフォートランレベルで扱えるようにデータ変換を行っている。

4.1 KSCでのデータ処理

SCMデータは、KSCでの受信終了後、磁気ディスクまたは磁気テープを使ってDPS (disk programming system)で処理プログラムを起動し、LPに例として図5にあげたようなI-Vデータを打出すことによって得ている。

4.2 駒場でのデータ処理

駒場での処理は、中形コンピュータF230/38を使用して行っている。

図6に処理プログラムの簡単なフローチャートを示したが、まず、処理をしようとする周回数の指定を行った後、各種データの読み込みを開始する。初めにSCM測定器のON, OFF ($W_{13} B_7$)のチェックを行い、ONならば3節で述べたようにSCMはSASからのトリガー信号(SASパルス)で作動するため、SASデータ(W_{19})の読み込みと2個ある検出器(A, B)のどれからのデータであるか($W_{23} B_3$)をチェックの後、スピンの軸から

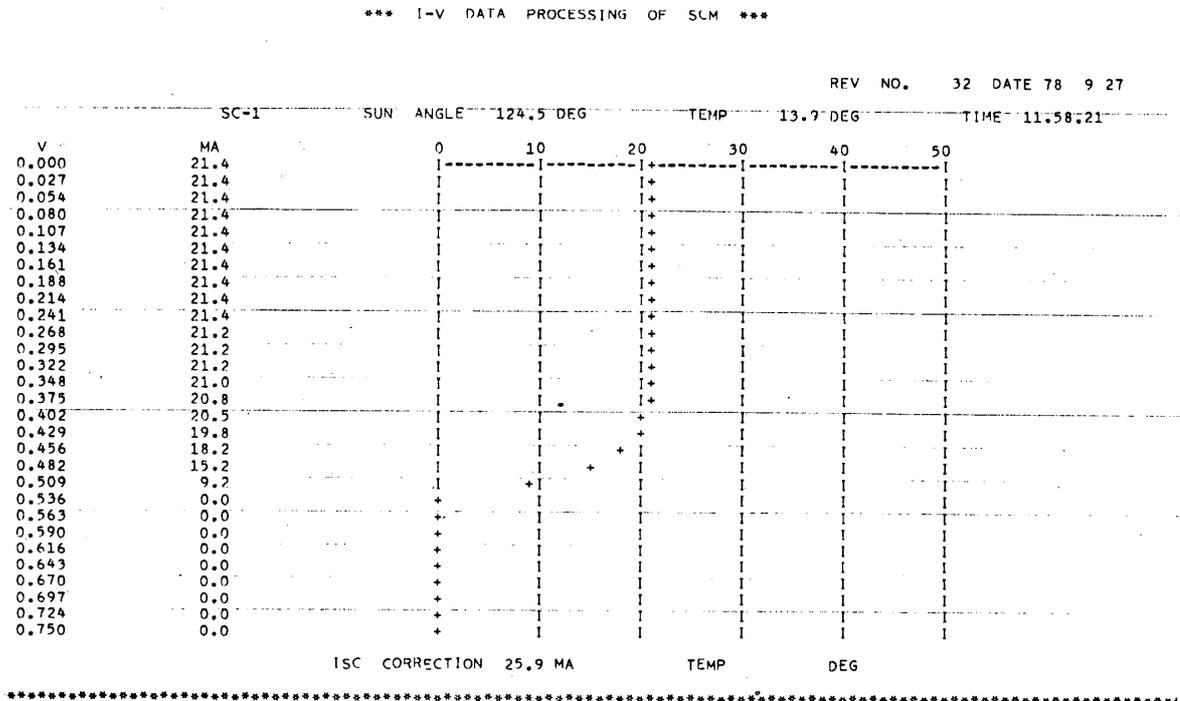


図5. ラインプリンタへの出力例 (KSCでの処理)

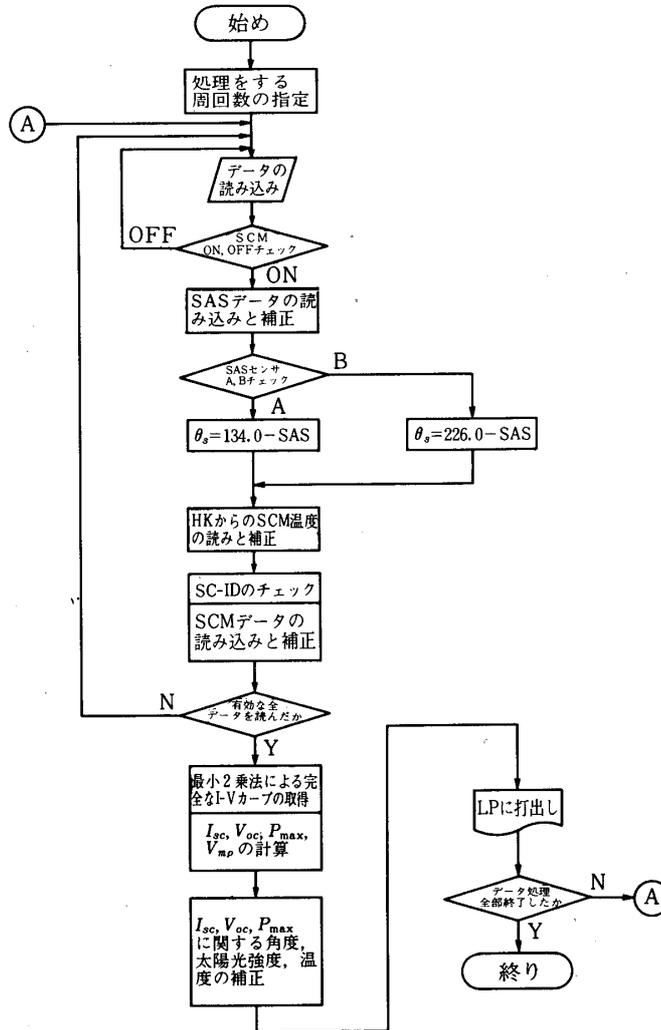


図6. 処理フローチャート

太陽光までの角度の補正を行う。また、SCM温度は環境計測器（HK）項目（ F_{22} ）に入っているため F_{22} の読み込みおよび物理量への変換を行う。

次にSCMのデータを読み込むわけであるが、被測定試料は6種類あるため、どの種類かの判定（SC-IDのチェック）を行ったのち、電流として有効なデータのみを収集して補正を施す。これらのデータは0から750 mVまでの29ステップの電圧に対する電流を測定しているため、その間の補間を最小2乗法で行い完全なI-Vカーブにしたのち、 I_{sc} （短絡電流）、 V_{oc} （開放電圧）、 P_{max} （最大電力）、 V_{mp} （最大電力点電圧）を求めて、各種補正を施しその出力をラインプリンタに打出す。

処理プログラムの各種補正の部分を図7に、またラインプリンタへの出力例を図8に示す。

SOURCE	LIST	
0173	IF (PSC(1),LE,PMAX) GO TO 1400	
0174	PMAX=PSC(1)	
0175	VP=VSC(1)	
0176	1400 CONTINUE	
0177	VOC=VSC(1)	
0178	IF (1,E0,1) GO TO 1500	
0179	IF (KSC(1),LE,0.0) GO TO 1600	
0180	1500 CONTINUE	
0181	1600 CONTINUE	
C	*** ANGLE CORRECTION OF SHORT CIRCUIT CURRENT ***	
0182	ANGST=SANG	
0183	CANG=90.0-ANGST	
0184	CANG=PI*CANG/180.0	
0185	SCC=SC(1)/COS(CANG)	Iscの角度補正
0186	C DISTANCE CORRECTION	
	SCC2=SCC*139.6/135.3*(ESR**2)	Iscの太陽光強度の補正
0187	C *** TEMPERATURE CORRECTION AT 28 DEGREE ***	
0188	SCC3=SCC2/(1-(0.000467*(28.-TEMP(1))))	Iscの温度補正
0189	MK=1REV/10	
0190	CVOC=VOC-0.00215*(28.-TEMP(1))	Vocの温度補正
0191	PMAX1=PMAX/COS(CANG)	Pmaxの角度補正
0192	PMAX2=PMAX1*139.6/135.3*(ESR**2)	Pmaxの太陽光強度の補正
0193	PMAX3=PMAX2-0.0591*(28.-TEMP(1))	Pmaxの温度補正
	CC=PMAX3/(SCC3*CVOC)	
C		
0194	IF (ID,E0,1) GO TO 2001	
0195	IF (ID,E0,2) GO TO 2002	
0196	IF (ID,E0,3) GO TO 2003	
0197	IF (ID,E0,4) GO TO 2004	
0198	IF (ID,E0,5) GO TO 2005	
0199	IF (ID,E0,6) GO TO 2006	
0200	GO TO 2007	
0201	2001 XSC1(KKK)=SC(1)	
0202	XSCS1(KKK)=SCC3	
0203	XVOC(KKK)=VOC	
0204	XCVOCK(KKK)=CVOC	
0205	XPMAX(KKK)=PMAX	
0206	XCPMAX(KKK)=PMAX3	
0207	XCC(KKK)=CC	
0208	GO TO 2007	
0209	2002 YSC1(LLL)=SC(1)	
0210	YSCS1(LLL)=SCC3	
0211	YVOC(LLL)=VOC	
0212	YCVOCK(LLL)=CVOC	
0213	YPMAX(LLL)=PMAX	
0214	YCPMAX(LLL)=PMAX3	
0215	YCC(LLL)=CC	
0216	GO TO 2007	
0217	2003 OSC1(JJJ)=SC(1)	
0218	OSCS1(JJJ)=SCC3	
0219	OVOCK(JJJ)=VOC	
0220	OCVOCK(JJJ)=CVOC	
0221	OPMAX(JJJ)=PMAX	

図 7. 処理プログラムの一部

5. 飛しょう結果

「じきけん」の打上げ後、昭和 53 年 9 月 18 日の第 5 周より行われた S C M の初期動作チェックが終了し、60m アンテナ伸展後のスピンの速度 (0.72 rpm) になった第 32 周目より、昭和 54 年 4 月 25 日の第 628 周まで太陽電池 6 素子の I-V 特性データが取得された。

打上げ直後の第 5 週のデータについては、飛しょう前の地上データと比較したところ、6 節で述べるように異常な低下が認められた。第 5 周前後の状況および第 4 号科学衛星「はくちょう」の S C M データなどを勘案して、飛しょうデータの解析には飛しょう前の地上データを基準にとるのを止め、以下では第 32 周を基にして第 622 周までの飛しょうデータ (I-V 特性) について検討を行った。これは 5 周以後のデータで、前述の低下が回復する兆しが見られなかったからである。

まず、得られた I-V 特性の中から I_{sc} と P_{max} の 2 点を選択し、飛しょう日数毎に I_{sc} と P_{max} のデータをプロットした。その結果をそれぞれ図 9 と 10 に示す。

REV NO= 622	SC= 1	ACQUISITION ISC = 21.9(MA)	CORRECTION ISC(ANG=90)= 22.4(MA)	ISC (AT 28C)= 23.5(MA)
4/23	TEMP = 7.6(C)	DATA VOC = 0.535(V)	DATA ISC(RCRC) = 23.5(MA)	VOC (AT 28C)=0.491(V)
4H57M18S	SUN ANG= 78.5(DEG)	PMAX= 8.608(MW) AT 0.418(V)		PMAX(AT 28C)= 7.958(MW) FF = 0.688
REV NO= 622	SC= 2	ACQUISITION ISC = 23.0(MA)	CORRECTION ISC(ANG=90)= 23.5(MA)	ISC (AT 28C)= 24.7(MA)
4/23	TEMP = 9.7(C)	DATA VOC = 0.536(V)	DATA ISC(RCRC) = 24.5(MA)	VOC (AT 28C)=0.497(V)
4H58M49S	SUN ANG= 77.5(DEG)	PMAX= 9.152(MW) AT 0.421(V)		PMAX(AT 28C)= 8.697(MW) FF = 0.708
REV NO= 622	SC= 3	ACQUISITION ISC = 25.3(MA)	CORRECTION ISC(ANG=90)= 25.8(MA)	ISC (AT 28C)= 27.1(MA)
4/23	TEMP = 8.7(C)	DATA VOC = 0.557(V)	DATA ISC(RCRC) = 26.9(MA)	VOC (AT 28C)=0.515(V)
5H 1M53S	SUN ANG= 78.5(DEG)	PMAX=10.528(MW) AT 0.431(V)		PMAX(AT 28C)=10.063(MW) FF = 0.720
REV NO= 622	SC= 5	ACQUISITION ISC = 24.2(MA)	CORRECTION ISC(ANG=90)= 24.7(MA)	ISC (AT 28C)= 26.0(MA)
4/23	TEMP = 7.6(C)	DATA VOC = 0.554(V)	DATA ISC(RCRC) = 25.8(MA)	VOC (AT 28C)=0.510(V)
5H 4M55S	SUN ANG= 78.5(DEG)	PMAX=10.849(MW) AT 0.420(V)		PMAX(AT 28C)=10.343(MW) FF = 0.780
REV NO= 622	SC= 6	ACQUISITION ISC = 23.0(MA)	CORRECTION ISC(ANG=90)= 23.6(MA)	ISC (AT 28C)= 24.8(MA)
4/23	TEMP = 9.7(C)	DATA VOC = 0.535(V)	DATA ISC(RCRC) = 24.6(MA)	VOC (AT 28C)=0.496(V)
5H 6M27S	SUN ANG= 76.5(DEG)	PMAX= 5.073(MW) AT 0.419(V)		PMAX(AT 28C)= 8.652(MW) FF = 0.703
REV NO= 622	SC= 1	ACQUISITION ISC = 22.1(MA)	CORRECTION ISC(ANG=90)= 22.5(MA)	ISC (AT 28C)= 23.6(MA)
4/23	TEMP = 7.6(C)	DATA VOC = 0.535(V)	DATA ISC(RCRC) = 23.4(MA)	VOC (AT 28C)=0.491(V)
5H 7M57S	SUN ANG= 79.5(DEG)	PMAX= 8.673(MW) AT 0.418(V)		PMAX(AT 28C)= 7.996(MW) FF = 0.688
REV NO= 622	SC= 2	ACQUISITION ISC = 22.8(MA)	CORRECTION ISC(ANG=90)= 23.4(MA)	ISC (AT 28C)= 24.7(MA)
4/23	TEMP = 9.7(C)	DATA VOC = 0.536(V)	DATA ISC(RCRC) = 24.4(MA)	VOC (AT 28C)=0.497(V)
5H 9M29S	SUN ANG= 76.5(DEG)	PMAX= 9.088(MW) AT 0.421(V)		PMAX(AT 28C)= 8.468(MW) FF = 0.698

FACOM 230 OS2/VS FORTRAN S FTMAIN V-03 L-66 DATE 79.05.29 TIME 14.36 PAGE 0005

図8. ラインプリンタへの出力例 (駒場での処理)

得られた飛しょうデータ (図9, 図10) は, 温度, 光強度 (四季により太陽光強度が変動する) および θ_s (衛星スピニング軸と太陽光のなす角) がそれぞれ異なるために, 各素子の特性を直接比較することができない. そこで飛しょうデータを温度 28°C, 光強度 139.6 mW/cm², θ_s 90度 (6素子の太陽電池に垂直に太陽光が入射するとき) の条件で補正を行った結果を図11~図16に示す. なお, SC-1とSC-4に関しては, 写真1に示すSCMパネル上下部にあるプロテクタ用保持金具 (プロテクタ自体は打上げ直前に取外してある) による太陽光の反射と太陽光のしゃへの影響も考慮した.

6. 検 討

前章で述べたように, 打上直後の第5週の Iscデータについては, 飛しょう前の地上データと比較したところ, 表2に示したように地上データに対する変化の割合が-7.1~-13.8%と大幅な低下が認められ, Xeソーラシミュレータの均一度に±2%を考慮して, オーバオールで約3%の精度としても-4.1~-10.8%の減少となる [6]. 「じきけん」では

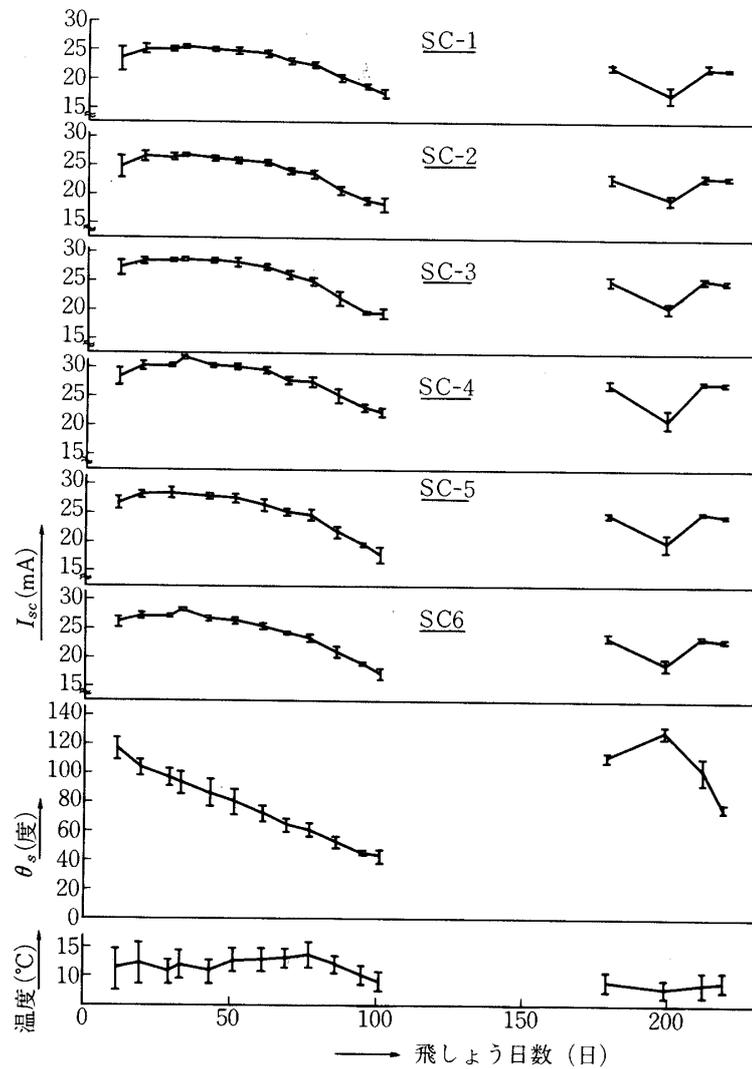


図9. SCMの飛行データ (Isc)

表2. 飛行直後の Isc

識別番号	地上データ(A)	REV. 5のデータ(B)	$\frac{B-A}{A}$	カバーガラスの厚さ	素子の種類
SC-1	31.9 mA	27.9 mA	-12.5%	0.15mm	きよっこう用
SC-2	36.2	31.2	-13.8	0.15	じきけん用
SC-3	35.4	32.4	- 8.5	0.30	"
SC-4	36.6	34.0	- 7.1	0.60	"
SC-5	37.4	33.4	-10.7	0.15 Ceria	"
SC-6	35.5	32.8	- 7.6	0.30 C. C*	"

測定条件：光強度 139.6 mW/cm^2 ，温度 28°C ，

*C. C.: Conductive Coating

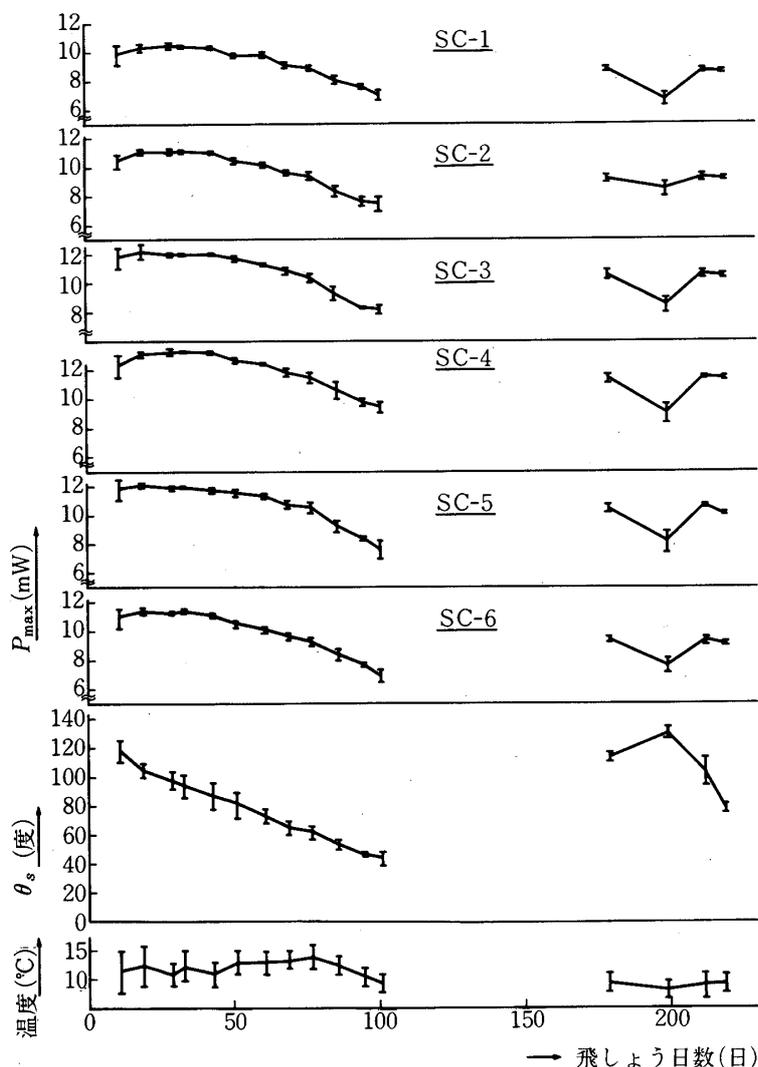


図 10. S C M の飛しようデータ (Pmax)

プラズマ圏界面付近を飛しよう中磁気サブストームが発生すると、高エネルギー電子の流入により衛星が帯電して放電による搭載機器の誤動作や衛星周辺に発生する電界による測定上の不具合が生じる。このような不具合をとり除くため、電源となる太陽電池には表面導電性 (conductive coating) カバーガラスを張り付け、その電極部を接地した [7] が、S C M センサ部では上記処置を施さなかった。一方、54年2月21日に打上げられた4号科学衛星「はくちょう」のS C Mではこの種の低下は生じていない上、図17の劣化予測データからも明らかのように打上げ2日後の減少は2%以下であること、およびこれまで得られた図2の校正回路 (C A L回路) 出力が正常なことより、推測の域を出ないが「じきけん」ではS C Mのセンサ部に「じきけん」特有の不具合が発生したと考えられる。しかし、原因の確認できない現象をそのままにして検討を進めるわけには行かないので、ここでは飛しよう前の

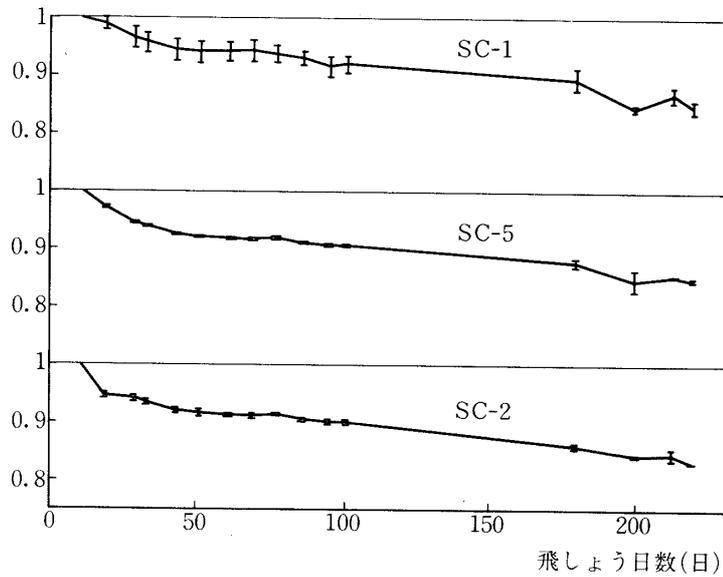


図11. カバーガラス厚0.15 mm (SC-1, SC-2, SC-5) の Isc 補正データ

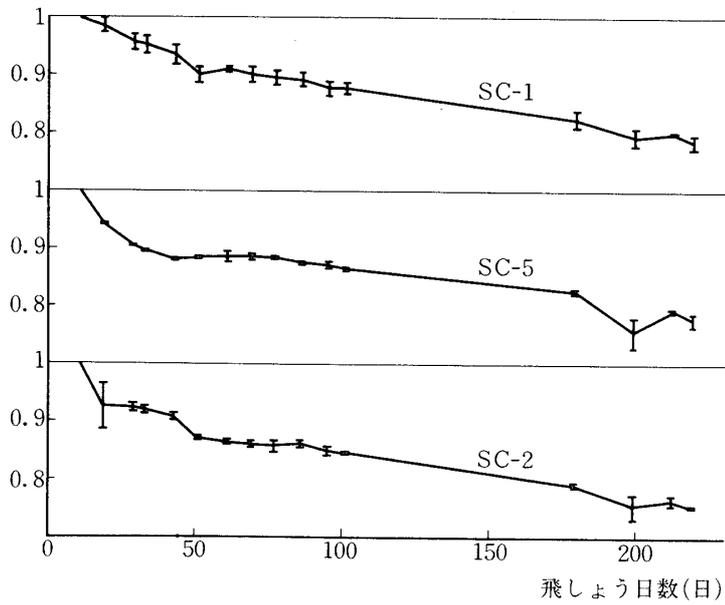


図12. カバーガラス厚0.15 mm (SC-1, SC-2, SC-5) の Pmax 補正データ

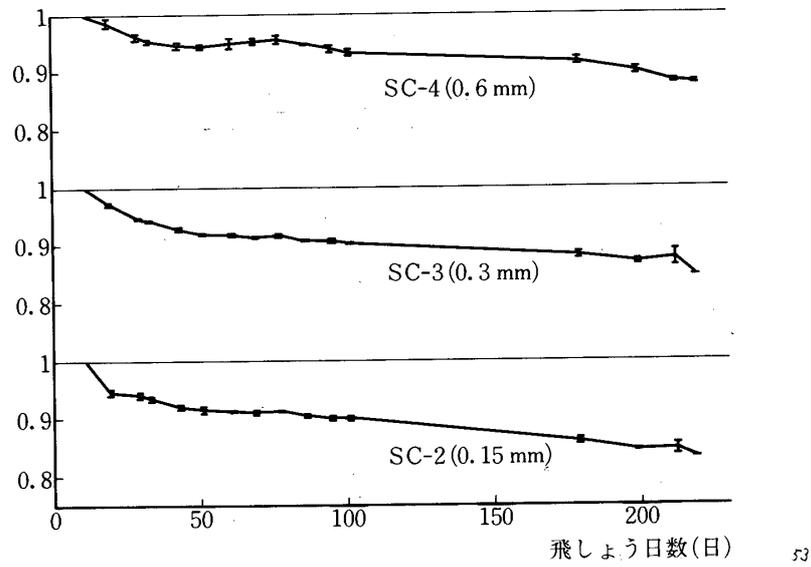


図13. 熔融石英 カバーガラス付素子 (SC-2, SC-3, SC-4) の Isc 補正データ

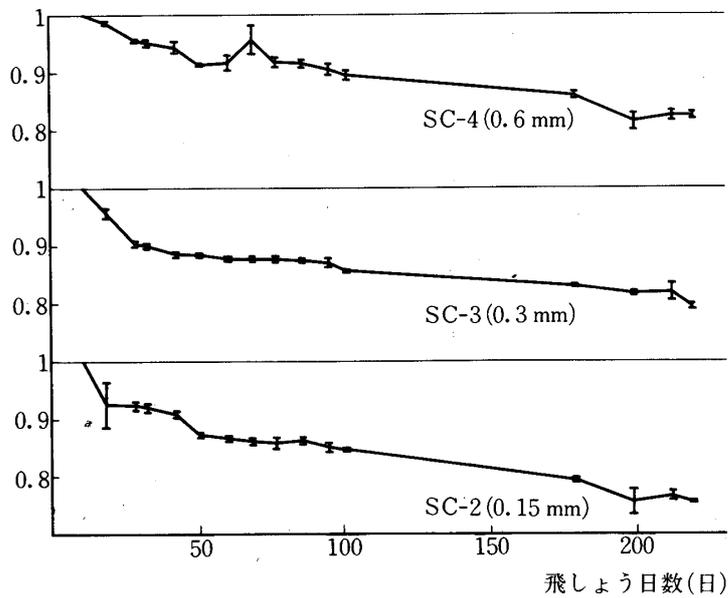


図14. 熔融石英 カバーガラス付素子 (SC-2, SC-3, SC-4) の Pmax 補正データ

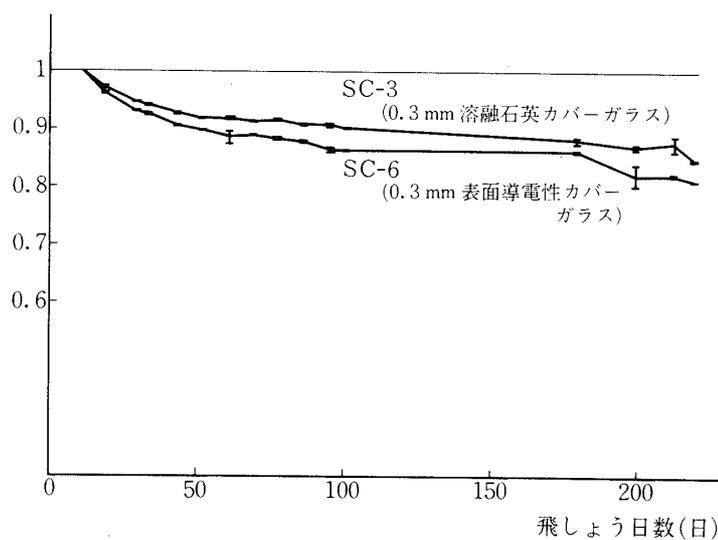


図15. 熔融石英と表面導電性カバーガラス付素子 (SC-3, SC-6) の I_{sc} 補正データ

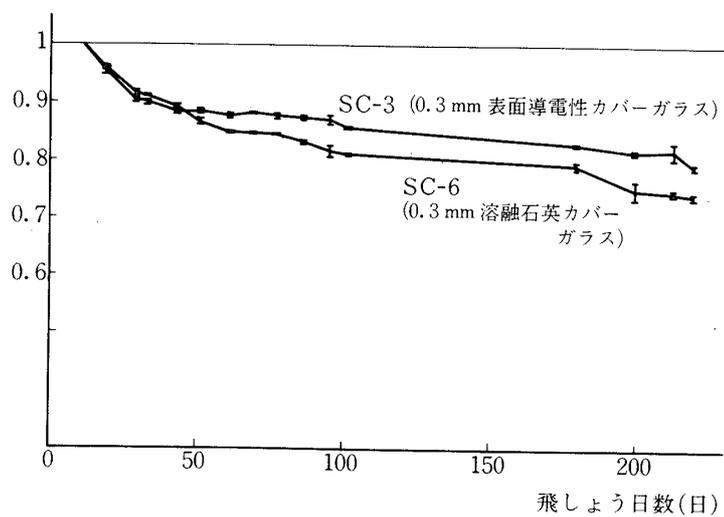


図16. 熔融石英と表面導電性カバーガラス付素子 (SC-3, SC-6) の P_{max} 補正データ

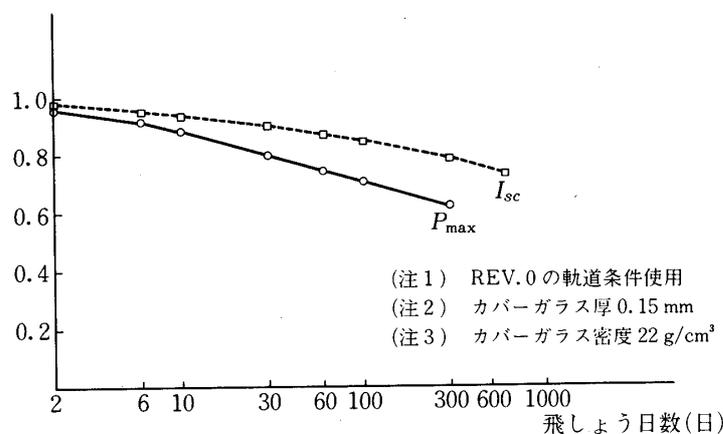


図 17. 「じきけん」の放射線による太陽電池出力劣化予測

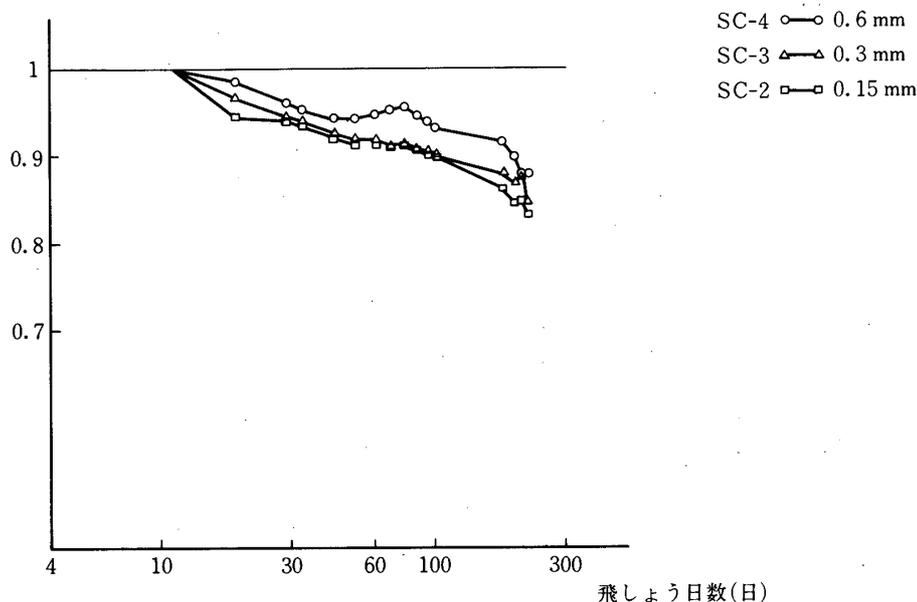


図 18. 熔融石英カバーガラス厚さと放射線劣化率の関係 (I_{sc} 特性)

地上データを使って正規化するのは止め、第32週のデータを基準にした。

まず、素子と同じBSF太陽電池で熔融石英カバーガラス厚さが0.15, 0.3, および0.6 mmの各太陽電池の I_{sc} と P_{max} の補正データ (図13と14)を、カバーガラス厚さをパラメータにしてまとめた結果を図18と19に示す。この結果、飛しよう後180日以前で見ると、傾向的には0.6 mm厚さのカバーガラス付き太陽電池は、他の薄いカバーガラスのものより約5% I_{sc} , P_{max} の放射線劣化が少ない。

つぎに各カバーガラス厚さによる放射線劣化率の飛しようデータと文献[8]で述べた計算法による予測値の比較検討結果を図20と図21に示す。この種の計算では軌道条件はすべ

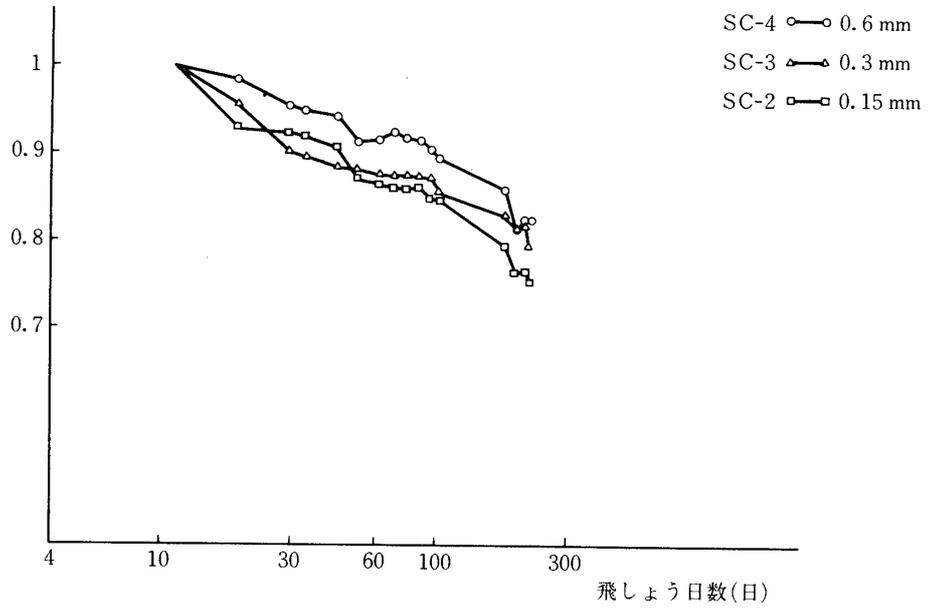


図19. 熔融石英カバーガラス厚さと放射線劣化率の関係 (Pmax 特性)

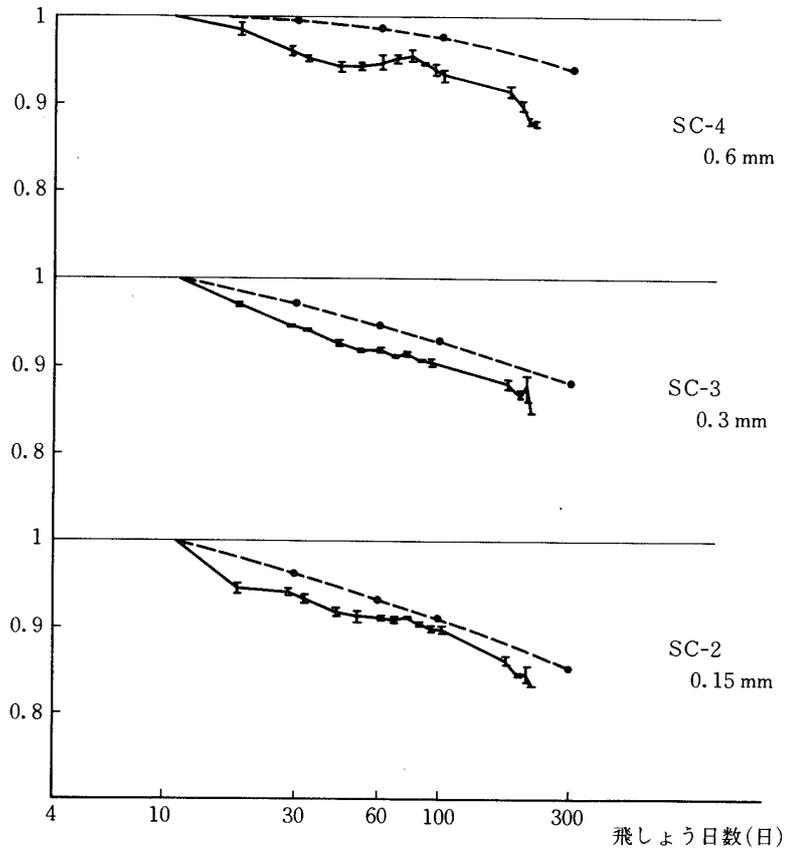


図20. 飛行データと予測値の関係 (Isc特性)

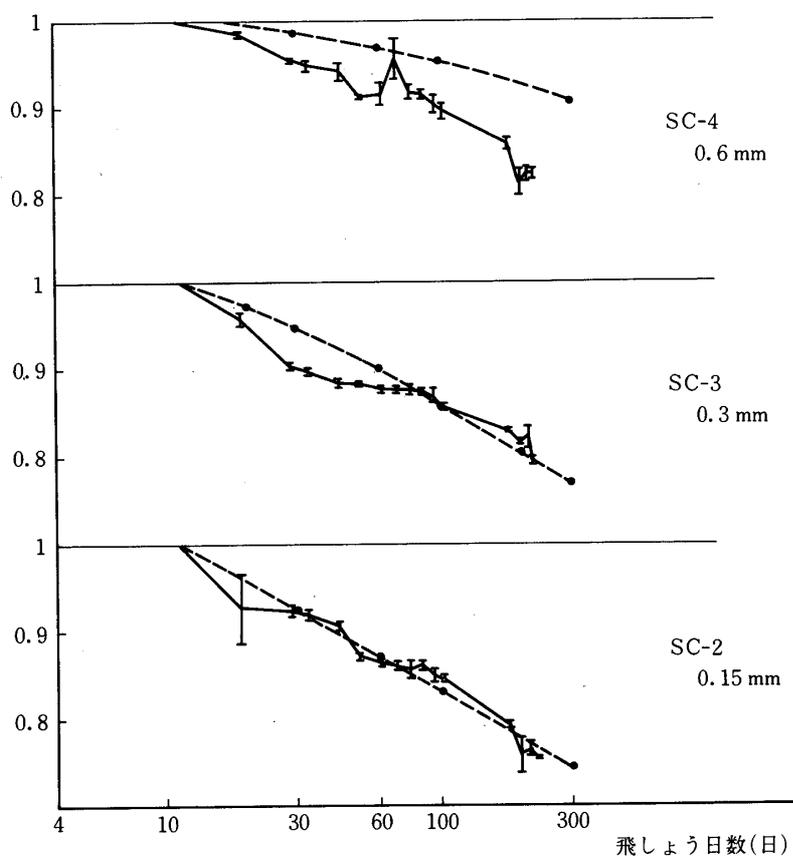


図 21. 飛しょうデータと予測値の関係 (Pmax 特性)

て表 3 を用いた。両図から

- (1) I_{sc} は 0.15 mm, 0.3 mm, 0.6 mm の各厚さの太陽電池に関しては、予測値より飛しょうデータの方が放射線劣化が大きい。
- (2) P_{max} は 0.15 mm と 0.3 mm 厚さの両者に関してはほぼ予測値と合っているが、0.6 mm 厚さの太陽電池に関しては予測値より劣化が大きい。
- (3) カバーガラス厚さが厚くなるほど、飛しょうデータが予測値より劣化が大きくなること
がわかる。

(3) の推定理由の一つとして、SCM 用太陽電池素子のカバーガラスにおおわれていない部分、例えば、バータイプに固有の電極部や太陽電池の裏面および側面への放射線入射による出力劣化が、無視できなくなる可能性をあげることができる。特に裏面や側面への入射は、衛星の形状および搭載機器配置によって大きく異なるわけだが、写真 3 の中面パネル上での SCM パネルの取付け位置、写真 1 のような SCM パネルの素子配置およびその高さが電源用太陽電池パネルより約 1 cm 高いことなどを考えると、これらの露出部分への入射の機会を全面的に否定することはできない。

以上の理由の確認のため、今後上述の露出部分への放射線入射も定量的に考慮して計算精

表 3. 「じきけん」の軌道 6 要素

周回数	—	第 0 周	第 414 周
元期	—	1978年9月16日5時6分16秒(UT)	1979年2月10日00時00分00秒(UT)
軌道長半径	a	21523.914 (km)	20943.662 (km)
離心率	e	0.693136	0.681759
軌道傾斜角	i	31.075 (度)	31.401 (度)
昇交点赤経	Ω	108.306 (度)	40.289 (度)
近地点引数	ω	99.901 (度)	205.041 (度)
平均近点離角	M	0.752 (度)	286.636 (度)

度を上げると共に、各種のしゃへい法によるバラツキも含めた地上および軌道上での S C M データの取得を考える必要がある。

次に、カバーガラス厚さが 0.15 mm の太陽電池 (S C - 1, S C - 2, S C - 5) の I_{sc} と P_{max} の補正データ (図 11, 図 12) をまとめて図 22 に示す。これより

- (1) 「きょっこう」のパネル用太陽電池と「じきけん」のパネル用太陽電池には同じ熔融石英カバーガラスを張り付けてあるが、 I_{sc} と P_{max} とともに前者の方が耐放射線性が良い。これは後者の方が B S F 効果のため、初期出力の絶対値が大なることと、理由は明確でないが放射線劣化の著しいことによる [9]。

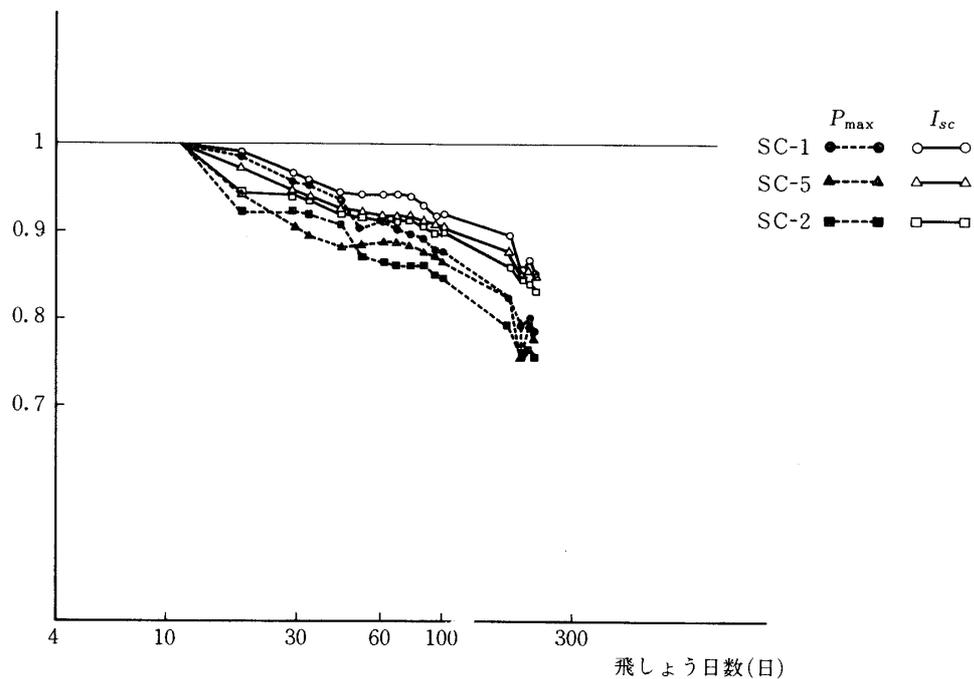


図 22. カバーガラス厚さ 0.15 mm (S C - 1, S C - 2, S C - 5) の I_{sc} , P_{max} データ

(2) Ceria カバーガラスは溶融石英カバーガラスに比して多少（約1～2%）耐放射線特性が良い。周知のように、放射線の実効的なしゃへい厚さはしゃへい材料の密度と厚さの積で与えられるから、同一厚さなら密度の若干大なるCeドープマイクロシートの方が有利というわけである。

最後に溶融石英と表面導電性カバーガラス（厚さはいずれも0.3mm）付き太陽電池の I_{sc} と P_{max} の補正データ（図15, 図16）をまとめて図23に示す。

これによると、表面導電性カバーガラス付き太陽電池は通常の衛星に使用されている溶融石英よりも放射線劣化が大きく、かつ予測値よりも劣化が大きいことがわかる。

一方、衛星ボディに実装されている表面導電性カバーガラス付き太陽電池パネル出力電流の、飛しょうデータと放射線による劣化予測値との関係を図24に示す。本図によれば予測値より飛しょうデータの方が劣化が少くない。この差の原因は、SCM用のバータイプよりパネル用のコーナタイプの方がカバーガラスにおおわれていない部分が少なく、前述の衛星の形状やSCMパネルの素子配置などによる露出部分への放射線入射は少なくともほとんど考えなくて済む上、電極部分にシリコン系の接着剤を塗ってあり、放射線による劣化を防止しているためと思われる。

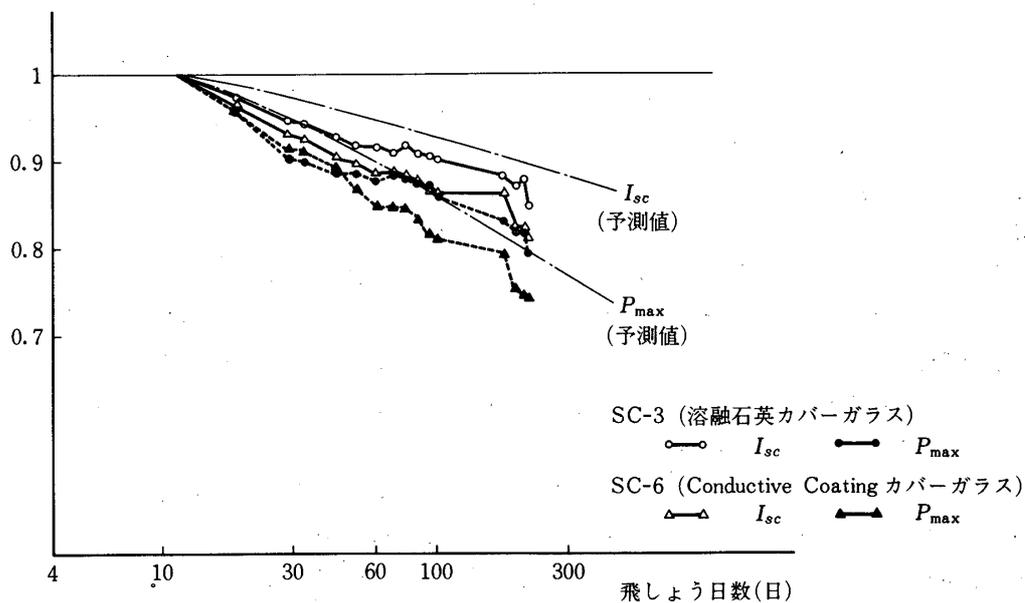


図 23. 0.3 mm 厚さの溶融石英と表面導電性カバーガラス付素子の放射線劣化

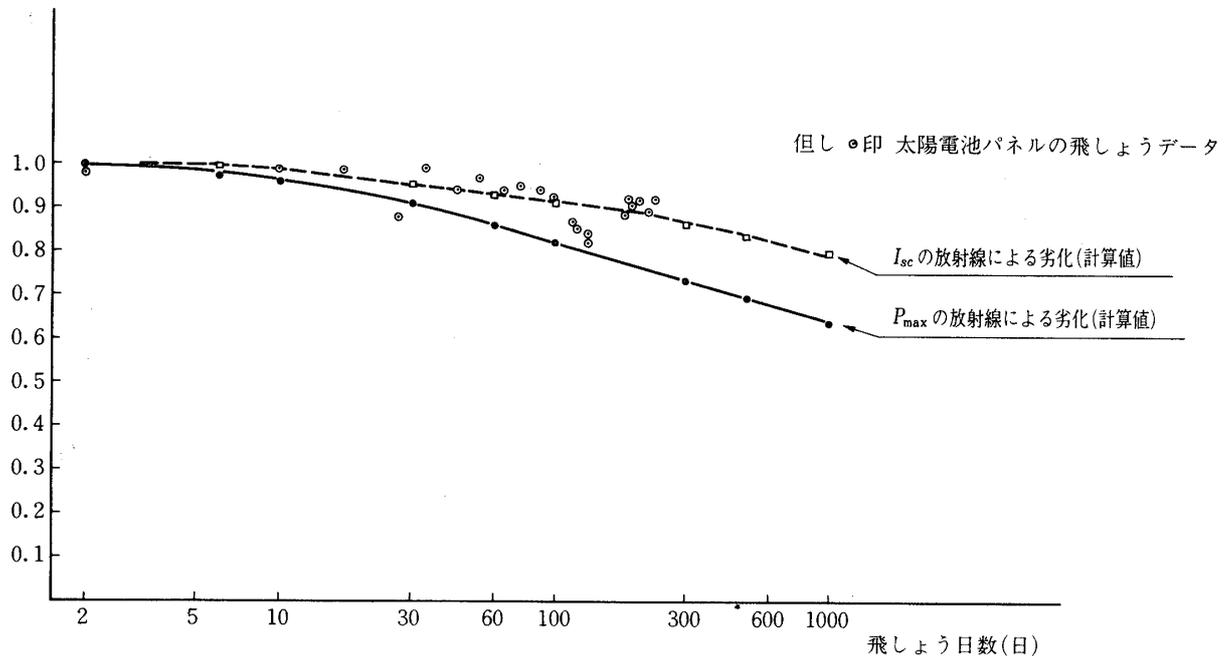


図24. 「じきけん」太陽電池パネル出力電流の飛しょうデータと放射線による劣化計算値との比較

7. む す び

「じきけん」に搭載のSCM(太陽電池特性計測装置)パネルに実装した6枚の $1 \times 1 \text{ cm}^2$ の n/p 型太陽電池素子について第5周～第622周までの飛しょうデータの内、短絡電流と最大電力に検討を加えた。その結果、従来発表されている結果と若干異なる次の事実が得られた。

(1)BSF (Back Surface Field) 太陽電池に張り付ける溶融石英カバーガラスの厚さを

0.15, 0.3 および 0.6 mm と変えてやると、予想通り厚い程特性劣化は少ないが、0.6 mmでの特性劣化が予測値より大きく、特に最大電力で顕著になる。

(2)第5周の短絡電流が飛しょう前の地上データに比べて4.1～10.8%低下しており、その後も回復していない。

これらの内(1)では、原因として0.6 mm厚さのカバーガラス付き素子の露出部(バートタイプ電極部、側面ならびに裏面)への放射線入射が考えられるが、今後飛しょう結果を正しく評価するために、露出部への放射線の入射量を定量的に測定するとか、地上でも各種のしゃへい法によるSCMデータを取得する必要がある。

「じきけん」はプラズマ圏界面付近を飛しょうするので、その間磁気サブストームに見舞われると、高エネルギー電子の流入により衛星が帯電して放電による搭載機器の誤動作や衛星周辺に発生する電界による測定上の不具合が生じる。これらを取り除くための電源用太陽電池には表面導電性カバーガラスを張り付け、その電極部を接地したが、SCMセンサ部ではこのような処置を施さなかった。それは、導電性以外のカバーガラスも使用していたので

見送ったわけだが、(2)は恐らくこれが原因だとの推測も成り立つが確証はない。

ご指導ご鞭撻をいただいた野村民也所長はじめ、諸先生、太陽電池素子の製作、校正ならびにSCMの製作、データ取得などに協力していただいたシャープ(KK)、日本電気(KK)および宇宙研の関係各位に厚くお礼申し上げます。

1979年6月15日 新設部(工学)

参 考 文 献

- [1] J.R. Carter, Jr, and H.Y. Tada : The Solar Cell Radiation Handbook, TRW Systems Group, for the Jet Propulsion Laboratory (June 1973).
- [2] F.W.Sarles, Jr., et al. : Solar Cell Calibration Experiments on LES-6, Conf. Rec. 7th Photovoltaic Specialists Conf., p. 262 (1968).
- [3] 後川, 高橋(慶), 河端, 高橋(武), 富田 : 気球による衛星用太陽電池の校正実験, 東京大学宇宙航空研究所報告, **13**, 3(B), p. 773 (昭52)
- [4] 後川, 高橋, 富田, 原, 越智, 村中 : 衛星用太陽電池特性計測装置(SCM), 昭53 信学総全大, 1938
- [5] J.Mandelkorn, et al. : Simplified Fabrication of Back Surface Electric Field Silicon Cells and Novel Characteristics of Such Cells, Conf. Rec. 9th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., p. 66 (1972).
- [6] 高橋, 河端, 富田, 後川 : 「じきけん」搭載SCMの飛翔結果(I), 昭54 信学総全大, 295.
- [7] 後川, ほか : EXOS-B用太陽電池のConductive Coating, 科学衛星シンポジウム, p. 12 (昭52).
- [8] T. Orii, K. Miyazaki and Y. Takami : Radiation Damage to Solar Cells (Scientific Satellite in Japan), Proc. 11th Int'l Symp. on Space Technology and Science, p. 527 (1975).
- [9] B.E. Anspaugh and T.F. Miyahira : Electron Irradiation of Modern Solar Cells, NASA CP-2020, p. 207 (1977).