

低地球軌道プラズマ環境下での二次アーク発生条件*¹ Threshold for Secondary Arc Formation on Solar Array in Low Earth Orbit Plasma Environment

麻 生 誠 司*²・北 村 倫 基*²・細 田 聡 史*²・金 正 浩*²

Seiji ASO, Tomoki KITAMURA, Satoshi HOSODA, Jeongho KIM,

趙 孟 佑*²・香 河 英 史*³

Mengu CHO and Hideshi KAGAWA

Key Words: Plasma, Solar Array, Sustained Arc

Abstract: Arcing on satellite solar array due to interaction with space plasma may cause permanent loss of satellite power, once the arc becomes permanent sustained arc. An arc on solar array becomes a secondary arc when solar array circuit is short-circuited and provides energy to the arc plasma. The permanent sustained arc, the final stage of the secondary arc, destroys a solar array string or the complete power circuits at the worst case. To investigate the threshold conditions for the secondary arc formation, laboratory tests are carried out in a xenon plasma chamber simulating LEO plasma environment with an external circuit simulating a spacecraft power system. Solar array coupon panels simulating the hot and return ends of a string circuit are tested for various combinations of string voltage and string current. Experimental results show that formation of secondary arc strongly depends on the string voltage and duration of secondary arc depends on the string current.

1. は じ め に

近年、太陽電池アレイ上で発生する放電現象が問題となっている¹⁾。太陽電池アレイ上には第 1 図に示すように、電界が強められる導体・絶縁体・空間の接するトリプルジャンクションが存在する。衛星の電位は、流入・流出する電流のバランスにより決まり、それらは周囲のプラズマ環境、日照条件、表面物性などに依存するものである。宇宙空間では接地点がとれないため、通常は金属でできた構造体を接地点とし、太陽電池アレイの負極は接地点に繋がれている。

太陽電池アレイのカバーガラスと導体との電位差がある閾値を超えると、トリプルジャンクション付近で単発の放電が発生する²⁾。カバーガラスに蓄えられた電荷が供給源であるこの放電を一次アークと呼び (primary arc, トリガ放電と称されることも多い)、一次アークが発生すると太陽電池セルの出力低下や電磁干渉による搭載機器の誤作動などが懸念される。太陽電池アレイは、限られた面積にできるだけ多くの太陽電池セルを敷き詰める必要があるため、1 mm 以下のギャップを隔て同一直列回路の正極と負極が隣り合うことも珍しくない。太陽電池の発電電圧に近いような電位差のかかるギャップ付近で一次アークが発生すると、放電プラズマが正極・負極間を短絡させ、発電する太

陽電池アレイがエネルギーを供給することで放電が維持される二次アーク (secondary arc) と呼ばれる現象に発展することがある。二次アークの発生によるアークが、導電性基板との絶縁を維持していたポリイミドシートを熱的に破壊し、太陽電池セルと導電性基板との間に恒久的短絡経路を形成する。これにより、その太陽電池アレイ回路の負荷への出力が失われ、衛星の運用に支障をきたす。この現象は、1997 年に発電電力の 15% を失った放送衛星 Tempo-2 における不具合原因として提唱されたものである³⁾。

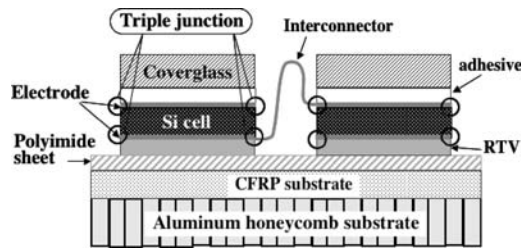
二次アークには第 2 図に示すように 3 段階ある。隣接した太陽電池セル間に短絡経路が形成されるが一次アーク中にのみ電流が流れる現象 (非持続放電, non-sustained arc) と、一次アーク後にも放電電流が流れるが自然に消滅する非恒久的持続放電 (non-permanent sustained arc)、意図的に太陽電池アレイ回路を遮断するまで電流が流れ続ける恒久的持続放電 (permanent sustained arc) である。第 2 図で I_{SC} は太陽電池アレイ 1 直列回路分の発電電流であり、太陽電池の短絡時に流れる電流値にほぼ等しい。放電電流の定義は未だ国際的に確立されておらず、第 2 図の非恒久的持続放電を単に二次アーク、恒久的持続放電を単に持続放電と呼んでいる場合も多い。

二次アークの発生条件、恒久的持続放電への移行条件は、太陽電池アレイの隣接セル間の電圧 (列間電圧, V_{ST})、発電電流 (列電流, I_{ST})、隣接セル間のギャップ長、一次アークの規模などとの関係が示唆されているが、未だに不明瞭である。さらに、打上げ前の衛星において二次アークに対

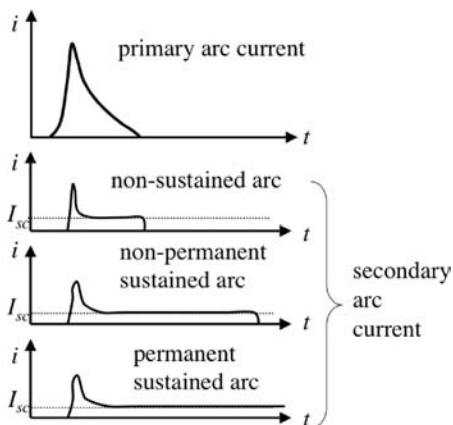
*¹ © 2005 日本航空宇宙学会
平成 17 年 3 月 28 日原稿受理

*² 九州工業大学

*³ 宇宙航空研究開発機構



第1図 太陽電池アレイの構造

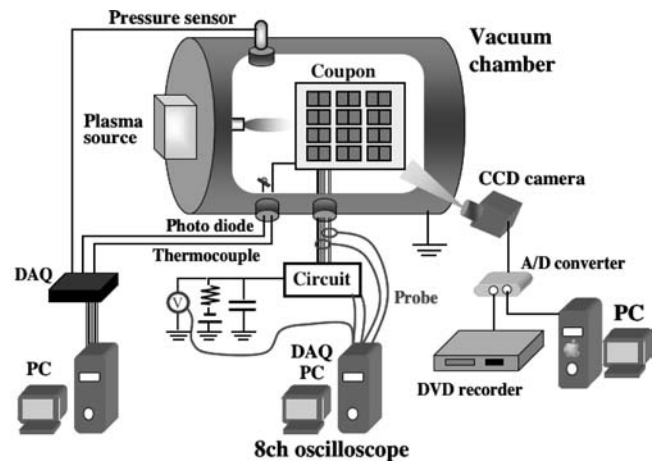


第2図 放電電流の定義

する太陽電池アレイ回路耐性を評価する地上試験は各国で行われているものの、現在のところ試験条件の国際的基準が存在しない。国際的試験基準の欠如は、多国間で製造され運用を行っている衛星が不具合を起こした際の責任の所在に混乱を引き起こす恐れがある。Gaillot ら⁴⁾は、二次アークの発生に関し、太陽電池セルの種類、隣接セル間のギャップ長、繰り返し発生する一次アークや二次アークの影響を地上試験において調査されるべきであるとしている。ECSS (European Cooperation for Space Standardization)⁵⁾は2004年9月に宇宙機帯電に関する試験基準案を発表した。その中で、二次アークに対する太陽電池アレイ耐性の評価試験を行う必要のない列間電圧・列電流の値を定めているものの、試験すべき放電回数は明確ではない。

太陽電池アレイの二次アーク現象の理論的解析については、一次元方向のエネルギーと質量の保存を使った小電流真空アークの放電維持理論⁶⁾を応用したものが僅かに存在する程度である^{7, 8)}。これらの理論は太陽電池間のギャップを一次元でモデル化したものにとどまっており、複雑な形状への応用には未だ課題が多い。何よりも、二次アーク発生条件について網羅的に調べた研究例^{4, 9)}が未だに僅かしか存在せず、まずは実験データの蓄積が望まれる。

太陽電池アレイの二次アークに関する実験方法としては、静止軌道環境を模擬して高エネルギー電子ビームや紫外線を使用する方法と、低地球軌道環境を模擬して低エネルギープラズマを使用する方法の2種類に大別される。本稿では、低地球軌道プラズマ環境を模擬した実験方法を採用するが、その理由としては一次アークが比較的簡単に発生するので



第3図 実験システム

データ取得が容易であること、低地球軌道用次世代高電圧太陽電池アレイの開発に向けた基礎データの取得を行うことである。低地球軌道プラズマ環境での実験データが静止軌道衛星に適用できるかどうかについては、未だ議論が分かれるところであるが、今回の実験データは静止軌道環境を想定した実験データとの比較対象として有意義なものとなる。

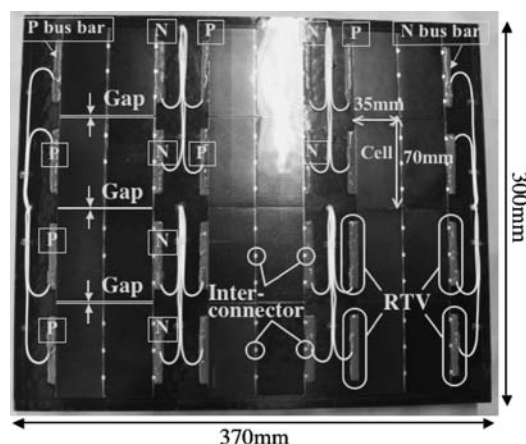
本研究の目的は、地上試験において二次アークの発生条件を調査することである。本論文においては、太陽電池アレイの列間電圧と列電流をパラメータにとり、二次アークが発生する閾値を調査したので報告する。

2. 実 験

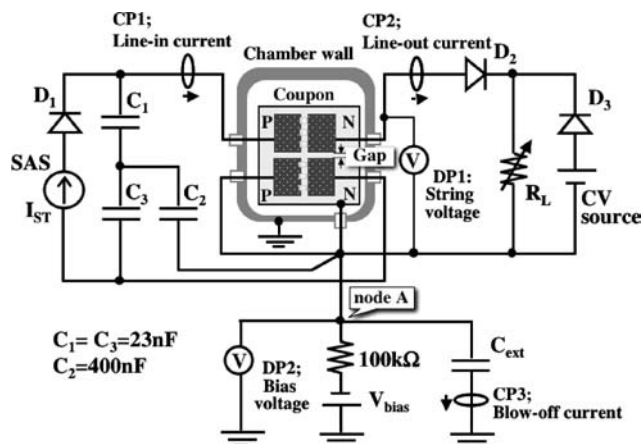
2.1 実験システム 第3図に実験システムの模式図を示す。直径1m、長さ1.2mの円筒形をした真空チャンバー内に、試験用に製造された太陽電池アレイクーポンをアクリル板に貼付けて設置している。排気はロータリポンプとターボ分子ポンプにより行われ、最高到達真空度は約 1×10^{-5} Torrであり、試験中はプラズマを生成し 1×10^{-4} Torr程度に保たれる。プラズマは動作ガスにキセノンを用いECRプラズマ源により生成される。プラズマの状態は真空チャンバー内に設置されたラングミュアプローブにより測定され、密度 10^{12} m^{-3} 、電子温度1eV程度であり、低地球軌道環境を模擬している。

電流導入端子を介し外部回路に繋がれた太陽電池アレイクーポンを直流電源により負バイアスし放電を発生させ、そのときの放電波形を実験回路中に設置した各プローブで検出し、高速AD変換ボード(National Instruments NI5102)により直接PCに取り込まれる。また、CCDカメラにより試験中のクーポンの映像はリアルタイムにPCに取り込んでいる。実験後に施す解析プログラム¹⁰⁾により放電発生時間と発光箇所が特定され、放電波形との適合を行うことが可能である。

2.2 太陽電池アレイクーポン 本実験では、第4図に示す実験用に製造された太陽電池アレイクーポン（以下クー



第 4 図 太陽電池アレイクーポン



第 5 図 実験回路

ポン)を用いた。クーポンにはインタコネクタにより直列に接続された 2 枚の単結晶シリコン太陽電池セルの組が 12 組貼付けられている。1 組あたりの太陽電池セルの $I-V$ 特性は、短絡電流が約 1.1 A、開放電圧が約 1.2 V である。各組の太陽電池セルの P バスバーと N バスバーにはケーブルが取り付けられており、このうちギャップを隔て隣接する 2 組の太陽電池セルから出る 4 本のケーブルを外部回路に接続し実験を行っている。このため、本クーポンでは最大で 9 箇所のギャップを使用できる。なお、バスバーは全て RTV シリコンゴムにより覆われている。クーポンの基板は、アルミハニカム/CFRP パネルにカプトンフェースシートを貼ったものであり、裏面は CFRP がむき出しである。

本実験の目的は、隣接する太陽電池セルのギャップ付近で発生する一次アークから二次アークへの移行条件の取得にあるが、一次アークはクーポン上の全てのトリプルジャンクションで発生する可能性があるため、ギャップ以外の金属部分はポリイミドテープで貼付け放電が発生しないように施した。さらに、クーポン裏面には CFRP が使用され一次アーク発生の可能性があるので、同様にポリイミドフィルムを貼った。

太陽電池アレイ 1 直列回路の正極と負極を模擬しているにもかかわらず、本クーポンに取り付けられている太陽電池セルの P バスバーから N バスバーへ方向が、ギャップを隔てて全て同一であるのは、セルの電圧降下を考慮して、4 枚の隣接した太陽電池セルが構成する 2 つのギャップに等しい電圧がかかるようになされたためである。実験には、平均ギャップ長が $698\ \mu\text{m}$ 、 $680\ \mu\text{m}$ であるこの種のクーポンを 2 枚用いた。それぞれ #01 クーポン、#02 クーポンと称する。これらのクーポンは、1 箇所のギャップを除き、過去にも実験で使用されたものである。そのため、放電の痕跡は予め存在している。

2.3 実験回路 第 5 図に実験回路を示す。実験回路は主に 2 つの回路から構成される。一次アークを発生させるための回路と、発電中の太陽電池アレイ回路を模擬した回路である。これは、太陽電池アレイ上で発生する放電による電氣的な動作を模擬する目的で Payan ら¹¹⁾により考案

されたものに基づいている。

第 5 図の node A より下部の回路は一次アークを発生させるための回路である。同部分中の定電圧源 V_{bias} には直流電源 (Takasago TMK 1.0-50) を用いており、軌道上の衛星導電体部分が有する電位を模擬している。直流電源は、放電電流が直接電源に流入するのを防ぐための $100\ \text{k}\Omega$ の制限抵抗を介し、アレイ回路の負極を模擬する太陽電池とクーポンの導電性基板に繋がれた node A に負電位を与えている。通常は $-100\ \text{V}$ 程度の電位を与えれば一次アークは発生するが、その程度の電圧では発生頻度が極めて低いため、実験の際は、放電回数を稼ぐために、より負に昇圧して放電頻度を上げて行っている。

第 5 図の node A と接地間には太陽電池アレイのカバーガラスの静電容量を模擬したコンデンサが接続されている。直流電源によりコンデンサに蓄えられた電荷は、一次アーク発生時に放出され、一次アークによる放電プラズマにエネルギーを供給する。軌道上での一次アーク発生時に、放電プラズマがカバーガラス上の電荷をどの程度取り込むのかは明らかではないため、コンデンサの値については各研究機関でも $100\ \text{pF}$ から $10\ \mu\text{F}$ と様々な値が選ばれている。本実験では、バイアス電圧が $-800\ \text{V}$ 、 $-1\ \text{kV}$ の場合に対し、 $3.2\ \text{mJ}$ の静電エネルギーを与える $10\ \text{nF}$ 、 $6.5\ \text{nF}$ をそれぞれ用いた。これらの値は放電時の発光により放電発生点を検出するための最小のエネルギーを得るために選んだ。

第 5 図の node A より上部の回路は、発電中の太陽電池アレイ回路を模擬している。実際の太陽電池パドルを真空チャンバー内に設置して発電状態で実験を行うことは、チャンバーの容積、光源の問題から不可能であるため、発電状態を模擬する電源が必要となる。この電源にソーラーアレイ・シミュレータ (Agilent E4351B) (以下 SAS) を用いて定電流源として使用している。一次アークは数 μsec ~ 数十 μsec のパルス波形であるため、その現象に追従できなければならない。実験室で一般的に用いられている直流電源は、数百 μF の出力キャパシタンスをもち、数 msec オーダーの応答速度である。これに対し、SAS は、 $50\ \text{nF}$ 以下の出力キャパシタンス、 $5\ \mu\text{sec}$ 以内の応答速度を有している。

SAS は定電流源として使用し、この設定電流値が太陽電池アレイの列電流に相当する。最大出力電流、電圧はそれぞれ 4 A、120 V である。実験では、太陽電池セル自身をダイオードとして使用し、発電時に電流が流れる向きとは逆向きに電流を流している。この設定であっても、隣接セル間に二次アーク電流が流れるときは、アークプラズマ中を流れる電流がセルとセルの間を流れることに変わりはなく、ミクロな部分での模擬は行っている。

第 5 図の $C_1 \sim C_3$ のコンデンサは太陽電池アレイ 1 回路分のもつ容量を等価なコンデンサで代替したものである。1 枚あたり 0.5 V で発電する単結晶シリコン太陽電池が 200 枚直列接続された太陽電池アレイを想定し算出した。 R_L は衛星の負荷を模擬した可変抵抗である。電源の SAS は定電流源として使用しているため、この可変抵抗を調節することによりクーポンの太陽電池セル間の電位差（列間電圧）を設定できる。ここで、試験回路図中の node A に接続された 2 直列接続の太陽電池セルを RTN セルと呼び、RTN セルより R_L での電圧降下分だけ高い電位の太陽電池セルを HOT セルと呼ぶこととする。同図中右側の定電圧源は他の太陽電池アレイ回路の発電電圧を模擬している。

通常は、第 5 図の SAS ~ HOT ~ R_L ~ RTN ~ SAS の経路で電流が流れ、正常に負荷に電力を供給している状態を表している。この電流は、直流成分から 10 MHz 帯域まで測定可能な電流プローブ（HIOKI 3274）CP1 と CP2 により検出される。一次アークの発生は、放電発生点をプラズマを介し地絡させるものであり、プラズマ中のイオンがコンデンサ C_{ext} に蓄えられた電子を中和するように流れ込む。このときに流れる電流をブローオフ電流と呼び、直流成分から 10 MHz 帯域まで測定可能な電流プローブ CP3（HIOKI 9274）で測定している。一次アーク時に上昇する C_{ext} の電位を、直流成分から 25 MHz 帯域まで測定可能な差動プローブ DP2（Tektronix P5200）で測定し、これをトリガ信号にして波形を記録している。一次アークによる放電プラズマが HOT-RTN 間を短絡させ、 R_L 上端の電位が定電圧源で電位を下回るとダイオード D_3 が閉じ、通常出力していなかった定電圧源が R_L に出力し始める。HOT-RTN 間の電圧、即ちアークの電圧が R_L での電圧降下分よりも低下すると、ダイオード D_2 が開く。これにより、今まで SAS が R_L に出力していた電流がアークに供給され列間に流れる。これが二次アーク中の電流経路であり、このとき電流プローブ CP1 には電流が検出されるが、CP2 に検出されなくなるため、二次アークの判定が可能となる。

二次アークの持続時間は数 μsec 以上で様々な値をとるが、その時間中続く放電波形を取得することが解析上重要であるため、オシロスコープは 8 チャンネルのものを使い 2 種類の時間レンジで測定している。1 ~ 4 チャンネルを短い時間レンジ、5 ~ 8 チャンネルを長い時間レンジとして、CP1、CP2、DP1 のプローブで検出した信号は分岐され長・短両方のレンジで測定される。

第 5 図の node A 下の 100 k Ω 抵抗により、放電発生時は node A の電位が 0 近傍に急上昇すると共に、 C_{ext} が再充

電されるまでの間 node A の電位は 0 近傍にとどまる。そして、その時間中も node A より上の部分での二次アークは進行する。これは低地球軌道プラズマ環境において、一次アークと二次アークが分離可能であるとの考えに基づいている。低地球軌道で太陽電池アレイの負極付近で放電が発生すると、まず放電プラズマ中の電子が放出されて、1 μsec より遥かに短い時間スケールで衛星電位を正側に急上昇させる。正電位をもった衛星に電離層電子が流入するが、衛星表面の絶縁体電荷を中和しなければならないのと、衛星電位と同電位を有する太陽電池アレイの負極付近にいわばプラズマコンタクトのように密度の濃い放電プラズマが維持されているので、負電位に瞬時に戻ることができない。よって、第 5 図に示す実験回路において、低軌道での放電発生時の衛星と太陽電池アレイの電位変動を模擬できる。

2.4 実験条件 第 1 表に試験条件を示す。本実験は高度数百 km の低地球軌道環境を模擬したプラズマ環境中で行われた。第 1 表の列間電圧は、衛星のバス電圧に相当する。

3. 実験結果および考察

3.1 放電回数 第 2 表、第 3 表に放電発生回数を #01 クーボン、#02 クーボンごとに分けてそれぞれ示す。 N_{PR} は一次アークの発生回数、 N_{NS} は N_{PR} のうち非恒久的持続放電に移行した回数を表し、さらに恒久的持続放電発生の有無と T_{EXP} に実験時間を記している。同一のギャップで継続的に実験を行うと、実験時間の増加に伴い一次アークの発生頻度が低下してくるため、一次アークの発生回数

第 1 表 実験条件

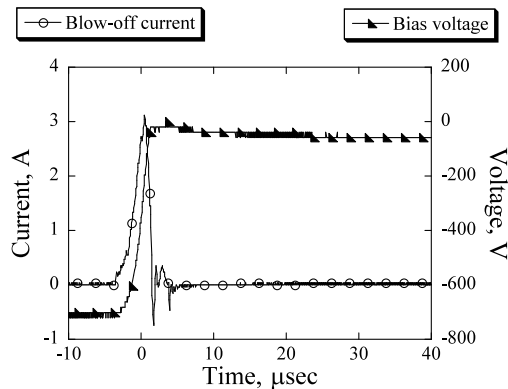
Back pressure, Torr	$1.1 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-4}$
Plasma density, m^{-3}	$9.1 \times 10^{11} \sim 4.3 \times 10^{12}$
Electron temperature, eV	0.5 ~ 1.6
Gap length, μm	552 ~ 898
String voltage, V	20 ~ 120
String current, A	0.3 ~ 4.0

第 2 表 放電回数（#01 クーボン）

V_{ST} , V	I_{ST} , A	N_{PR}	N_{NS}	Permanent sustained arc	T_{EXP} , h:m:s
50	0.5	204	0	No	1:23:55
50	1.0	137	0	No	0:06:59
60	1.0	108	0	No	0:08:53
50	1.5	144	0	No	0:44:36
60	1.5	134	0	No	1:10:17
55	2.0	129	0	No	0:41:55
50	2.5	194	1	No	0:18:31
55	2.5	45	0	No	2:05:55
55	2.7	24	0	No	1:10:57
55	3.0	45	1	No	2:15:00
50	3.5	52	0	No	1:34:18
55	4.0	25	0	Yes	0:08:56
100	0.5	331	182	No	0:30:29
110	0.5	46	8	No	0:20:03
100	1.0	190	139	No	1:54:56
120	1.0	10	2	No	1:03:16
100	1.5	2	1	Yes	0:01:05
100	2.0	5	1	Yes	0:01:05

第 3 表 放電回数 (#02 クーボン)

V_{ST} , V	I_{ST} , A	N_{PR}	N_{NS}	Permanent sustained arc	T_{EXP} , h:m:s
20	2.0	193	0	No	0:10:15
20	3.0	173	0	No	1:23:15
20	4.0	188	0	No	2:00:31
30	2.0	200	0	No	0:51:03
30	3.0	157	0	No	1:24:17
30	4.0	140	0	No	1:07:10
50	1.5	213	0	No	0:18:11
50	2.0	184	0	No	0:52:52
50	2.5	195	0	No	1:25:12
50	3.0	168	0	No	1:38:42
50	3.5	191	0	No	2:00:33
50	4.0	187	0	No	0:25:29
70	0.6	199	1	No	0:20:53
70	1.0	163	1	No	2:41:09
70	1.5	194	1	No	2:51:45
70	2.0	62	0	Yes	0:04:16
85	0.3	102	60	No	0:17:38
85	0.5	208	22	No	0:10:20
85	1.0	209	20	No	1:12:45
85	1.5	209	29	No	0:45:49
85	2.0	5	0	Yes	0:02:48
100	1.3	479	202	No	7:31:33



第 6 図 一次アーク発生時におけるバイアス電圧とブローオフ電流の変化の典型例

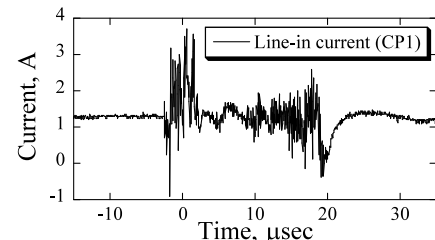
にはバラツキがある．このため，示した結果は，1 回の連続した実験で得られたものとは限らず，使用するギャップを変えるなどして数回に分けて取得したデータの積算であるものもある．2 つのクーボンで合わせて 8 種類の列間電圧・列電流の条件で恒久的持続放電を発生させることができた．いずれのケースも恒久的持続放電は，非恒久的持続放電を伴わずに発生，あるいは，1 回だけ二次アークを発生前に伴っていることが特徴的である．

3.2 各放電の特徴 $V_{bias} = -800$ V, $C_{ext} = 10$ nF のときの一次アークの発生によるブローオフ電流とバイアス電圧の変化の典型的な波形を第 6 図に示す．さらに， $V_{bias} = -800$ V, $C_{ext} = 10$ nF のときに取得されたブローオフ電流の特性を算出した結果を第 4 表に示す．第 4 表での電荷やエネルギーは電流と電圧の積や電流の瞬時値を時間積分して計算したものである．第 4 表に示された放電エネルギーは理論値の 3.2 mJ よりも低くなっている．これ

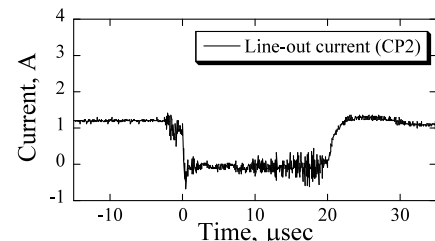
第 4 表 ブローオフ電流の特性 ($V_{bias} = -800$ V, $C_{ext} = 10$ nF)

	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation
Peak, A	2.81	4.96	3.58	0.473
Charge, μ C	7.03	7.71	7.30	0.0244
Pulse width, μ sec	4.25	6.35	4.97	0.482
Energy, mJ	2.46	2.70	2.57	0.00422

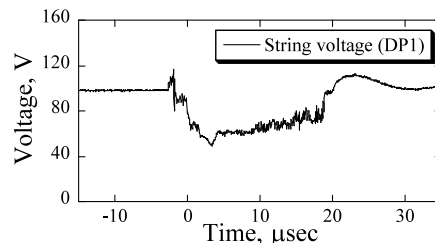
Data point: 26.



(a) CP1



(b) CP2

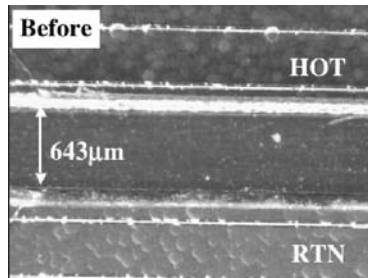


(c) DP1

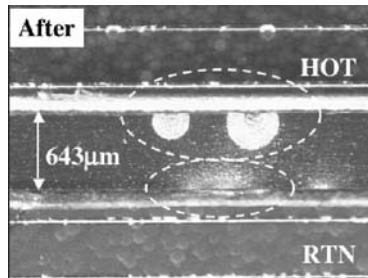
第 7 図 非恒久的持続放電の典型的波形

は第 6 図の一次アーク発生前のバイアス電圧の値からわかるように，第 3 図の実験回路において 100 k Ω の制限抵抗の電圧降下により C_{ext} のコンデンサにかかる電圧が 800 V よりも低下していたためであると考えられる．本実験では，このような特性をもつ一次アークを発生させて二次アークへの移行を調査した．

オシロスコープの短い時間レンジで取得した $V_{ST} = 100$ V, $I_{ST} = 1.3$ A のときの非恒久的持続放電の典型的な波形を第 7 図に示す．CP1 で設定電流値の 1.3 A が検出され，CP2 ではゼロになる時間が確認できる．CP1 から CP2 を引いた値が隣接セル間に形成されるアークに供給される電流値である．二次アークの判定に際し，二次アークの持続時間について詳細な定義を行った．まず，ブローオフ電流波形の立ち下がり部分において，ピーク値の 10% を初めて下回った時間を T_{end} とする． T_{end} 以降の時間において，アーク電流 (CP1 から CP2 を引いたもの) が設定電流値の



(a) 試験前



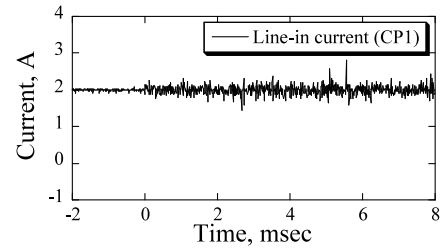
(b) 試験後

第8図 非恒久的持続放電による放電痕

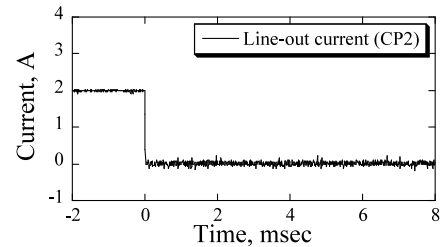
90%以上流れている時間をアークの持続時間（Duration）と定義した．二次アークは，ノイズなどの影響による誤判定を防ぐため，持続時間が $2\mu\text{sec}$ 以上のものとする．このうち，自然にアークが途切れるものが非恒久的持続放電，意図的に回路を遮断するまで流れ続けるものが恒久的持続放電である．この定義に従い二次アーク検出用のプログラムを作成し二次アークの判定を行った．第2表，第3表の非恒久的持続放電発生回数（ N_{NS} ）は，判定プログラムによりカウントしたものである．第7図の場合，二次アークの持続時間は $16.3\mu\text{sec}$ であった．なお，このように判定される二次アークでは第2図の非持続放電はカウントされない．

非恒久的持続放電発生前後に撮影されたギャップの同一箇所顕微鏡写真を第8図に示す．実験条件は $V_{\text{ST}} = 100\text{ V}$ ， $I_{\text{ST}} = 1.3\text{ A}$ であり，このギャップを使った実験はそれまでに行われていない．試験後には同図で確認されるような2種類の形状の放電痕が形成された．RTN側では，発生点から放射状に吹き出して広がっているように見られる．これに対しHOT側では，境界が確認できるほどはっきりとした円形の痕跡が確認できる．両者ともにアークの高熱により電極金属が溶解し蒸着されたものであると考えられる．このギャップで確認された放電痕は全てHOT側とRTN側でそれぞれ上記の特徴を有したものであった．

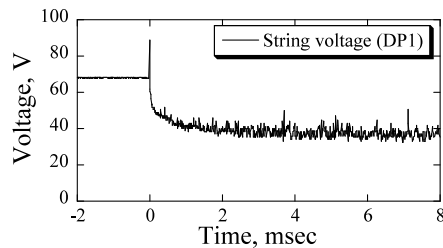
$V_{\text{ST}} = 70\text{ V}$ ， $I_{\text{ST}} = 2.0\text{ A}$ の条件で発生した恒久的持続放電時に各プローブで取得した波形を第9図に示す．この場合，オシロスコープで取得できたのは発生から約8msecまでの時間の波形であるが，電源を意図的にオフするまで120secの間電流は流れ続けた．発生の瞬間は強烈な発光を伴い，背圧は，発生前の $1.10 \times 10^{-4}\text{ Torr}$ から最大で約 $1.45 \times 10^{-4}\text{ Torr}$ まで上昇が確認された．この持続放電による太陽電池セルの損傷の様子を第10図に示している．太



(a) CP1

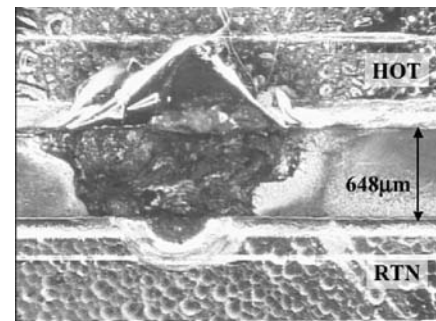


(b) CP2



(c) DP1

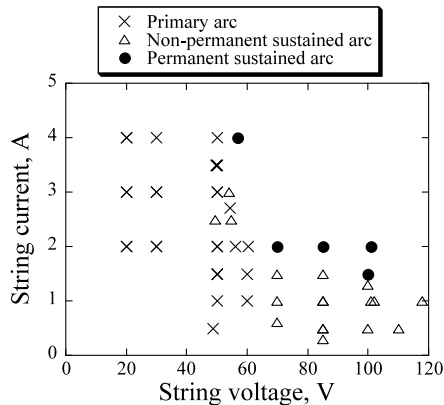
第9図 恒久的持続放電の典型的波形



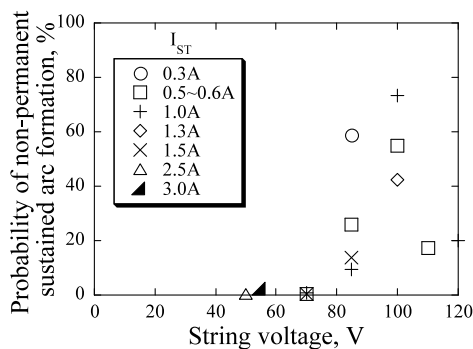
第10図 恒久的持続放電による太陽電池セルの損傷

陽電池セルと導電性基板とを絶縁していたポリイミド層が炭化され，ギャップだけでなく太陽電池セル自体にまでその被害は及んでいる．セルの電極と導電性基板間との抵抗値は，最低で 28.7Ω まで低下していた．

3.3 二次アーク発生の閾値 第2表，第3表から二次アークの発生の有無に対して，パラメータである列間電圧と列電流によるマッピングを行った結果を第11図に示す．二次アークの発生に対する列間電圧と列電流の係に反比例的な傾向が確認できる．一次アーク発生回数に対する非恒久的持続放電発生回数の割合を列間電圧の変化について算出したものを第12図に示す．これは，第2表，第3表の非恒久的持続放電の回数を一次アークの回数で割ったも



第 11 図 列間電圧と列電流による二次アーク発生閾値のマッピング

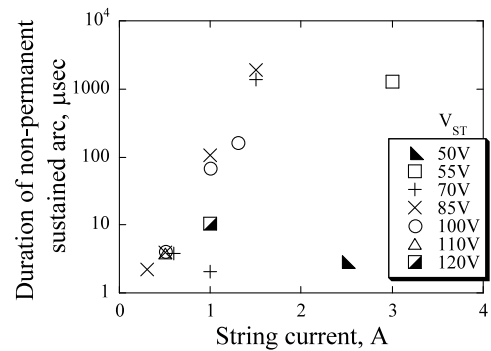


第 12 図 列間電圧に対する非恒久的持続放電発生率の変化

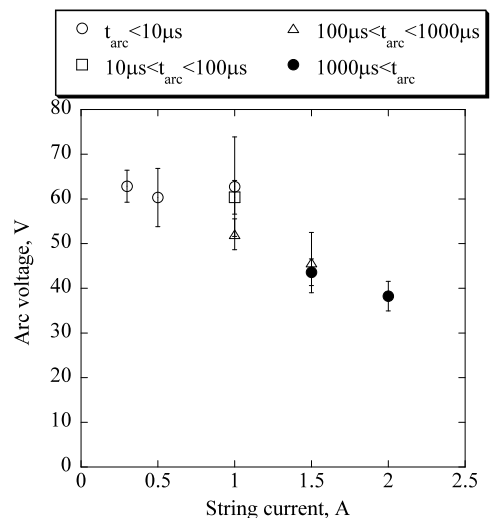
のである．同図より非恒久的持続放電発生率と列間電圧の間に比例的な傾向が確認でき，列間電圧は二次アーク発生率に大きく寄与していると考えられる．また，列間電圧が 70 V 以上では，0.3 ~ 0.6 A と低い列電流の値に対しても非恒久的持続放電の発生が多数見られる．この列間電圧の範囲では恒久的持続放電の発生は 1.5 ~ 2.0 A が列電流の閾値である．

列電流の条件が 0.3 ~ 0.6 A から 1.5 ~ 2.0 A までの間に発生した非恒久的持続放電に，恒久的持続放電への兆候が確認できると考え，第 13 図に列電流に対する非恒久的持続放電の持続時間（平均値）の変化をプロットした．この図から列電流の増加に伴い持続時間が増加していることがわかり，列電流はアークの維持に大きく寄与するものであると考えられる．

いったん，二次アークに移行すると，アーク電流は I_{ST} でほぼ一定であるが，短絡した電池間の電圧（アーク電圧 V_{arc} ）は初期値の列間電圧 V_{ST} から低下する．第 14 図に列電流とアーク電圧の関係をプロットする．第 14 図では，非恒久的持続放電のうち，同じ列電流でアークの継続時間（ t_{arc} ）別にデータが 4 個以上あるものの平均値を示す．エラーバーは標準偏差である．アーク電圧としては，各々の二次アークの終了時点の値を使った．（注：アーク電圧は二次アークの進行と共に低下するため，同じ列電流で比べた場合，継続時間の長いもの程，終了時点のアーク電圧は低い．）当然のことながら，アーク電流が増えと共にアーク



第 13 図 列電流に対する非恒久的持続放電の持続時間の変化



第 14 図 非恒久的持続放電の継続時間別の列電流とアーク電圧の関係

電圧も低下する．しかし，電流をどれだけ増やしても，アーク中で電子が電離電圧以上に加速されなければアークの維持は不可能であり，維持可能なアーク電圧には物理的な下限が存在する．二次アークを完全に抑制したければ，隣接太陽電池間の電圧がその下限値よりも小さくなるように設計すればよい．第 14 図から，例えば列電流 1 A の太陽電池アレイの場合，隣接太陽電池間の最大電圧を 30 V 以下に抑えれば，アークを維持するのが極めて困難であるといえる．

4. ま と め

低地球軌道環境を模擬したプラズマ雰囲気中の真空チャンバー内に設置した太陽電池クーポンパネルにおいて，列間電圧と列電流をパラメータにとり一次アークを発生させ，二次アークに移行する閾値の取得を行った．この結果から以下の結論を得た．

1) 平均ギャップ長が 700 μm のクーポンにおいて，列間電圧と列電流による二次アーク発生閾値のマッピングを行った．これより，二次アークの発生には，列間電圧と列電流の関係に反比例の傾向があることを確認した．

2) 二次アークの開始には列間電圧が，アークの維持には列電流が大きく寄与していることが確認された．

3) 本試験における恒久的持続放電は全て、非恒久的持続放電を伴わずに移行するか、あるいは1回だけ伴った後発生している。

4) 二次アークの放電痕について、HOT 側と RTN 側とで特徴的な差異が認められた。

本研究で使われた太陽電池アレイクーポンパネルを製作していただいた三菱電機株式会社に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 趙 孟佑, 藤井治久: 宇宙環境での帯電・放電現象についての研究動向と将来課題: 高電圧太陽電池アレイの放電現象と将来課題, 日本航空宇宙学会誌, **51** (2003), pp. 139–145.
- 2) Hastings, D. E. and Garrett, H.: Spacecraft Environmental Interactions, Cambridge Univ. Press, New York, 1996, pp. 195–198.
- 3) Katz, I., Davis, V. A. and Snyder, D. B.: Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Array in GEO, AIAA Paper 98-1002, 1998.
- 4) Gaillot, L., Boyer, E., Pélissou, P., Levy, L., Sarraill, D., Fille, M.-L. and Caswell, D.: Secondary Arcs on Solar Generators—EMAGS 2 Test Campaign, 8th Spacecraft Charging Technology Conference, 2003.
- 5) ECSS Secretariat: Space Engineering, Spacecraft Charging—Environment-Induced Effects on the Electrostatic Behavior of Space Systems, Draft Version 0.11a, ESA Publications Divisions, Noordwijk, the Netherlands, 2004, p. 61.
- 6) 森宮 脩, 鈴木節雄, 渡辺憲治: 小電流真空アークの不安定現象の解析, 電気学会論文誌 A, **119** (1999), pp. 190–196.
- 7) 趙 孟佑: 宇宙用太陽電池アレイ上の持続放電のモデリング, 電気学会研究会資料, ED-04-21, 2004.
- 8) Pierre, C., Payan, D., Degond, V. and Roussel, J.-F.: Secondary Arc Modelisation on Satellite Solar Generators, 9th Spacecraft Charging Technology Conference, Tsukuba, Japan, 2005.
- 9) Amorim, E., Levy, L., Sarraill, D., Gardou, J. P., Meunier, J.-L., Bogus, K. and Vacquie, S.: Secondary Discharges on Solar Arrays: Vacuum Arcs across Adjacent Biased Cells, J. Spacecraft Rockets, **42** (2005), pp. 329–335.
- 10) 豊田和弘, 趙 孟佑, 匹田政幸: 動画処理による真空環境下での太陽電池アレイ放電発生位置特定システムの開発, 日本航空宇宙学会論文集, **51** (2003), pp. 82–84.
- 11) Payan, D., Schwander, D. and Catani, J. P.: Risks of Low Voltage Arcs Sustained by the Photovoltaic Power of a Satellite Solar Array during an Electrostatic Discharge, Solar Array Dynamic Simulator, 7th Spacecraft Charging Technology Conference, 2001.