

宇宙用太陽電池の二次アークに対する 安全作動条件取得試験(WG1)

○ 北村 倫基、野村 正行、増井 博一、豊田 和弘、趙 孟佑 (九州工業大学)

Measurement of sustained arc threshold for satellite solar arrays (WG1)

Tomoki Kitamura Masayuki Nomura, Hirokazu Masui,

Kazuhiro Toyoda, and Mengu Cho (Kyushu Institute of Technology)

Key Words: Solar Array, Secondary Arc, Plasma

Abstract

In this paper, we report about the test result for Working Group 1(WG1), which was established to make a Japanese guideline for spacecraft charging design. We investigated threshold conditions of sustained arc inception. The TJ GaAs solar cells were tested. Laboratory tests were carried out with an external circuit simulating a spacecraft power system. Solar array coupon panels simulating the hot and return ends of a string circuit were tested under various combinations of string voltage and string current. We revealed that the threshold conditions of sustained arc formation were different in string voltage even if the string current are same.

1. 目的および背景

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⁾。宇宙機の電位は周囲のプラズマ環境、日照条件、表面物性などにより決定され、通常、の低地球軌道では宇宙機機体電位は発電電圧程度負に沈んでいる。しかし、静止軌道ではサブストーム発生時に機体電位が大きく負になる。この時、二次電子放出係数の違いにより、カバーガラス等の絶縁体と宇宙機機体との導体との間に電位差が生じる。図1に示した太陽電池の構造図において、絶縁体であるカバーガラスの表面電位が機体電位に対し負になる場合を順電位勾配と呼び、正になる場合を逆電位勾配と呼んでいる。

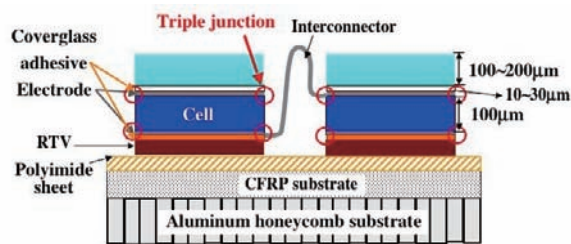


図1 太陽電池の断面

太陽電池アレイ上には図1に示すように局所的に電界が集中するトリプルジャンクション(導体・絶縁体・空間)が存在し、周囲の環境との相互作用により放電が発生することがある。この単発の放電は一次アーク(Primary Arc、以下PA)と呼ばれ、太陽電池セルの劣化や電磁波による搭載機器の誤動作を引き起こす。しかし、それ以上に懸念されるのが、PA直後の放電プラズマが絶縁体に蓄えられていた電荷を吸収して成長し、高い電位差を有する太陽電池アレイ

の隣り合うセル間を短絡させてしまうことである。この現象は二次アーク(Secondary arc)と呼ばれ、短絡電流は発電中の太陽電池アレイ自身により供給されるため、その間その回路の出力が失われる。最悪の場合太陽電池回路の破壊をも引き起こす可能性がある。二次アークにより太陽電池回路が故障し衛星の不具合に至った例も報告されている^{1,2)}。

二次アークは、短絡現象が自発的に終わる(Temporary Sustained Arc、以下TSA)か、あるいは恒久的に続く(Permanent Sustained Arc、以下PSA)かによって数段階にわけられる。図2に各放電の定義を示す。二次アークの定義について述べる。PA電流波形のたち下がり部分において、ピーク値 I_{peak} 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、アーク電流が設定電流値の90%以上流れている時間をアークの持続時間(Duration)と定義し、九州工大では持続時間が $2\mu sec$ 未満の放電をNSA(Non Sustained Arc)、 $2\mu sec$ 以上をTSA、そして恒久的に続く放電をPSAと定義している。

二次アークの発生条件は、太陽電池アレイの隣接セル間の電圧(以下、 V_{ST})、発電電流(以下、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。また、衛星の太陽電池アレイ回路耐性を評価するために、打ち上げ前に地上試験が行なわれている。しかし、現在のところ試験条件の国内基準が存在しない。このことは多メーカー間で製造され、運用され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。そのため、地上試験を行なう際の試験条件の国内基準というものが必要とされている。

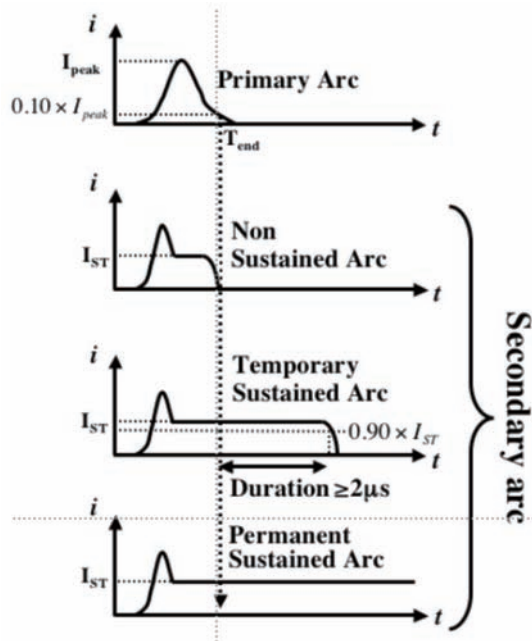


図2 一次アーク、二次アークの定義

本論文では、同一の太陽電池クーポンを用い、列間電圧、列電流の違いによる TSA、そして PSA の発生閾値検証結果について述べる。なお、この実験は宇宙航空研究開発機構(JAXA)主導による「帯電放電に関する衛星設計の国内標準」の一環として行われたものである。

2. 実験

2-1. 太陽電池アレイクーポン

試験で用いたクーポンの写真を図3に示す。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枚の三重接合 GaAs 太陽電池セルが12組貼付けられている。1枚当たりの大きさは76mm×37mmであり、R、B、Gと名付けられた3列で構成されている。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9箇所のギャップを使用できる。このクーポンの平均ギャップ長は1mmである。なおバスバーは全てRTV (Room Temperature Vulcanization) ゴムで覆われている。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、裏面はむき出しのCFRPをフィルムで覆っている。PA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覆うことにより放電を抑制させている。

クーポンは大気中から真空チャンバー内に設置し、

真空排気後に必ず70°C±1°Cで2時間ベーキングを行っている。

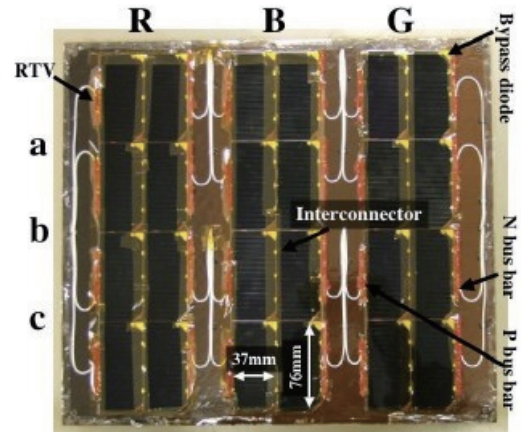


図3 クーポン概観

2-2. 測定系

図4に測定系の模式図を示す。太陽電池アレイは直径0.6m、長さ0.9mの真空チャンバー内に、セル面を上にしてアクリル板の上に配置されている。クーポンは真空チャンバーとは電氣的に絶縁されている。試験中、真空チャンバーは 1×10^{-3} 程度まで排気される。クーポンの真上には電子ビーム銃(ULVAC RHEED)が取り付けられており、試験中は電子ビームの中心が試験ギャップに照射されるようにクーポンを設置している。クーポンは定電圧電源 V_{bias} (GlassmanEW60kV)を用いて負にバイアスする。試験中の発光画像はカメラで撮影され、デジタル動画ファイルとしてPCに記録される。

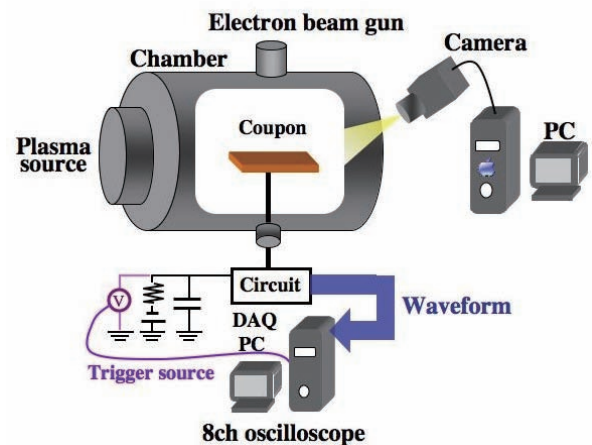


図4 試験システム

図5に持続放電試験用の回路を示す。図中の直流電流源 V_1 は、太陽電池の発電中を模擬する電源であり、PAのような数 μsec から数10 μsec の現象に追従できることが要求される³⁾。そのため、今回の実験では電流制御ダイオードを超並列にした直流電源を用いている。この電源は5nF以下の低出力キャパシタ

ンスと 0.5 μ sec 程度の回復時間を達成している。V₁ の出力電流値が列電流 I_{ST} である。R_L は擬似負荷抵抗であり、C₁~C₃ は GaAs 太陽電池アレイの 1 直列回路のセル 50 個 1 並列分の容量である。C_{ext} は衛星の全静電容量、V_{bias} は周囲のプラズマ環境において放電が発生する衛星の電位を表し、PA に放電エネルギーを与える。

PA では C_{ext} に蓄えられていた電子が、太陽電池セルからプラズマを介し接地されたチャンバーの壁への経路で流れる。このときに流れる電流をブローオフ電流と呼び、電流プローブ CP₃(HIOKI3274)で測定している。ここで、クーポンについて V_{bias} に対し R_L の電圧降下分だけ電位が高い方の太陽電池セルの列を HOT、他方を RTN と呼ぶことにする。

図 5 において定常時の電流は、V₁~HOT~R_L~RTN~V₁ の経路で流れる。これは負荷に電力を供給している状態を表している。定電圧源 V₂ は R_L の電圧降下よりも僅かに低い電圧値に設定されているため、通常電流を出力しない。それに対して PA 後の放電プラズマが HOT と RTN のセル間(あるいはセル-基板間)を短絡させると、V₂ が R_L に電流を流すとともに D₂ が遮断され、V₁ により R_L を流れていた全電流がセル間を流れ、ループを形成する。これが二次アークの電流経路である。二次アークの判別は、クランプオン式の直流電流プローブ CP₁(HIOKI 3273)と CP₂(HIOKI 3273)を用いて行う。二次アーク中は CP₁ に V₁ で設定した電流値の電流が検出され、CP₂ には電流が流れない。CP₁ から CP₂ の電流値を引いたものが、実際にセル間を流れる放電電流でありアーク電流 (Arc current) と称する。また、電圧値 V_{ST} は、持続放電中数十ボルト程度まで低下する。低下前の V_{ST} を列間電圧 (Inter-string voltage or string-substrate voltage) とする。これらの電流プローブと高電圧プローブは高速 AD 変換ボード (National Instruments NI5102) に接続されている。波形データは、高電圧プローブによって測定されるアレイ電位の放電による上昇をトリガとして放電波形が測定され、順次 PC に取り込まれる。

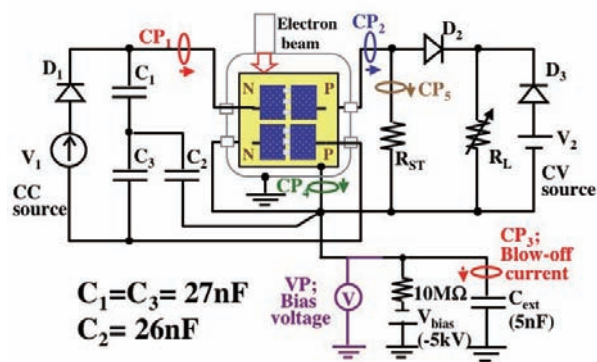


図 5 実験回路

2-3. 二次アーク閾値決定方法

各列間電圧につきギャップを 2 つ使用した。ここでそれらをギャップ A、B と呼称し、区別した。ギャップ A、B の選定は試験の便宜上、任意に選んでいる。実験では、表 1 の列間電圧と列電流値の条件で行った。

表 1 : 実験で用いる電圧および電流値

	String Voltage [V]									
	30V		50V		70V		90V		110V	
String Current [A]	5nF	33nF	5nF	33nF	5nF	33nF	5nF	33nF	5nF	33nF
	0.5	1.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
1	2.8	1	1	1.0	1	0.9		1	1	1
1.5	3.7	1.5	1.5	1.5		1.3				1.2
2		2	2			2				1.4
2.7										1.5
3.3										1.6
4										1.8
										2

Case1 : TSA 閾値検証試験

ギャップ A を使用した。外部容量には 5nF を用いた。試験ギャップにおいて PA を 30 回程度放電させた。その間に TSA が発生しなければ列電流値を上げる。これを TSA が発生するまで繰り返す。TSA が発生した場合はその時点で試験を終了し、その条件値を TSA 閾値とした。

Case2 : PSA 閾値検証試験

ギャップ A で TSA が発生した列電流値から試験を初める。外部容量には 5nF を用いる。ギャップで TSA を 10 回程度発生させ、その間に PSA が発生しなかった場合は電流値を上げる。これを PSA が発生するまで繰り返す。PSA が発生した場合はその時点で試験を終了し、その条件値を PSA 閾値とした。

Case3 : 外部容量の違いによる TSA 閾値検証試験

基本的にギャップ A を用いた(但し、試験の便宜上 90V と 110V の試験では、全く新しいギャップを用いた)。外部容量には 33nF を使用した。実験は Case1 で測定された TSA 閾値電流より一段階小さい電流値から始めた。その間に TSA が発生しなければ PA を計 30 回程度放電させ、列電流値を上げる。これを TSA が発生するまで繰り返す。TSA が発生した場合はその時点で試験を終了し、その条件値を TSA 閾値とした。このケースの目的は、放電時の静電エネルギーの大きさが、TSA の発生に影響を与えるかどうかを確認することである。図 6 に外部容量が 5nF と 33nF の場合のブローオフ電流波形を示す。Case3 ではアークへ供給される静電エネルギーが、0.4J となる。これは Case1 での静電エネルギー 0.06J と比べて約 6 倍大きい。

カバーガラス 1 枚あたり、比誘電率 $\epsilon_r=3.2$ 、面積 $S=76\text{mm}\times 37\text{mm}$ 、厚さ $d=100\mu\text{m}$ とすると、単位

面積あたりの容量は、およそ $C_{cg}=284\text{nF/m}^2$ となる。太陽電池アレイにおいて、乖離電圧の閾値が V_{diff} の場合、 Am^2 のカバーガラスに蓄えられている電荷の静電エネルギー E は、

$$E = \frac{1}{2} C_{cg} A V_{diff}^2$$

で与えられる。ここで、 $V_{diff}=800\text{V}^4$ とすると、 $E=0.4\text{J}$ のエネルギーに供給される太陽電池の面積 A は、

$$A = \frac{\frac{1}{2}(33 \times 10^{-9})(5 \times 10^3)^2}{\frac{1}{2}(284 \times 10^{-9})(8 \times 10^2)^2} \approx 4.5\text{m}^2$$

となる。よって、外部容量 33nF の条件は、太陽電池パネル 4.5m^2 に相当する。

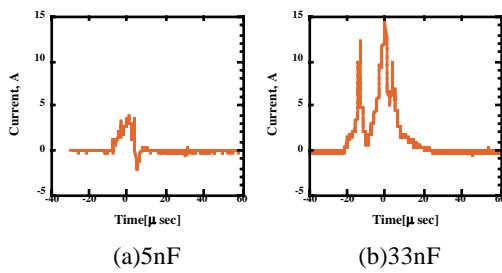


図6 一次アーク発生時におけるブローオフ電流の典型的波形 (列間電圧 110V 1.0A)

試験条件を表2に示す。図5の試験回路において $V_{bias}=-5\text{kV}$ である。表2の条件でビームを照射し、逆電位勾配を形成させ、放電試験を行った。

表2：実験条件

Beam energy[keV]	4.8-5.2
Beam current[μA]	10~100
Back pressure[Pa]	$0.8\sim 2.0 \times 10^{-3}$

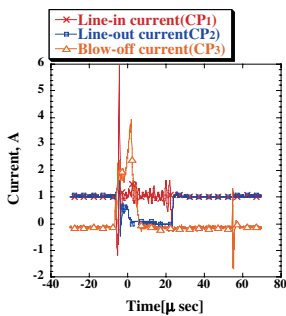


図7. TSAの典型的波形 (列間電圧 70V 1.0A)

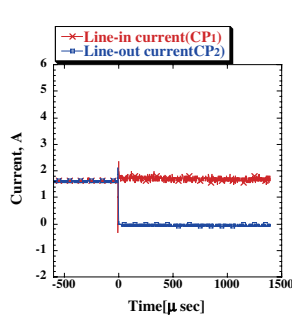


図8. PSAの典型的波形 (列間電圧 70V 1.5A)

3. 実験結果および考察

3-1. 二次アーク発生の閾値

二次アーク発生の有無に対して、列間電圧と列電流との関係を図7に示す。

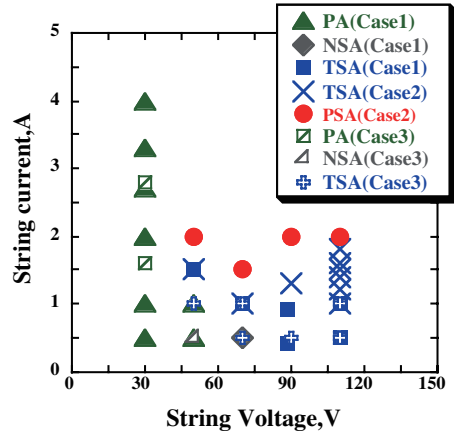


図9. 列間電圧と列電流と二次アーク発生閾値の関係

列間電圧 30V:

外部容量が 5nF の場合では、 4A まで電流値を上げ試験を行った。しかし TSA は発生せず、PA の発生のみ確認された。 33nF に容量を増加させた場合においても結果は同じであった。ただし 33nF の条件下では V_1 電源の不具合により十分なデータが取得できていない。

列間電圧 50V:

外部容量が 5nF の場合では、 1.5A で TSA が確認された。 PSA は 2A で発生した。外部容量 33nF の場合では、TSA が 1A でも発生し、外部容量の増加による TSA 閾値の低下が確認された。

列間電圧 70V:

外部容量が 5nF の場合では、 1.0A で TSA が確認された。 PSA は 1.5A で発生した。外部容量を 33nF にすると TSA が 0.5A でも発生し、外部容量の増加による TSA 閾値の低下が見られた。

列間電圧 90V:

外部容量 5nF の場合では、 0.4A で TSA が確認された。 PSA は 2A で発生した。外部容量 33nF では TSA が 0.5A で発生することを確認した。しかし 70V の結果から推測すると、 33nF の場合における TSA 閾値は 0.5A 以下である可能性が高く、外部容量による閾値の変化がないとは言い切れない。

列間電圧 110V:

外部容量が 5nF の場合では、 0.5A で TSA が確認され、 2A で PSA が発生した。外部容量 33nF の場合でも TSA が 0.5A で発生した。しかし 70V の結果から推測すると 33nF の場合の TSA 閾値は 0.5A 以下であ

る可能性が高く、外部容量による閾値の変化がないとは言い切れない。また 70V では 1.5A で PSA が発生したにも関わらず、110V では 2A まで PSA が発生しなかった。これは使用したギャップの個体差が影響している可能性があるが、明確な原因の特定はできていない。

図 10 に各列間電圧に対する TSA の持続時間の平均値を示す。なお、110V 1.4A 以上の条件時では、持続時間がデータ取得範囲を超える放電が多々発生した。そのため、その都度データ取得範囲を広くしていったが、持続時間データの取りこぼしが幾らかある。図 10 より外部容量の増加により、TSA 閾値が下がった条件において、継続時間が極端に長くなることはないことが分かった。さらに、TSA の継続時間は、列電流に依存しており、列間電圧や外部容量に依存しないことが確認された。この結果は、PSA が 50V から 110V まで、同じ程度の列電流値で発生している結果と相関がある。

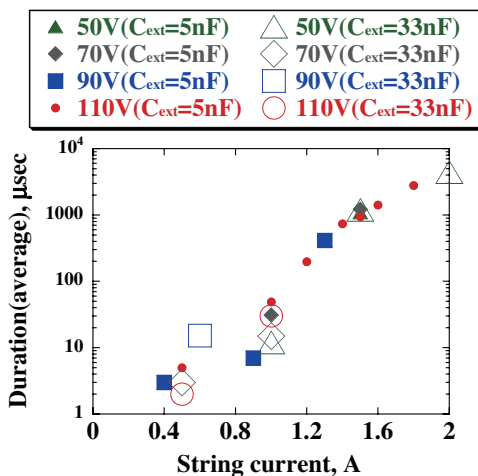


図 10. 列電流に対する二次アーク持続時間の変化(列間電圧 110V)

4. まとめ

電子ビーム環境逆電位勾配環境における二次アーク発生閾値の検証試験を行った。試験にはギャップ長 1mm のクーポンを用いた。その結果、5つの列間電圧値に対する二次アークの閾値を取得することができた。ただし 30V の場合は試験の上限値であった 4A においても二次アークが発生せず、二次アークの発生を確認できなかった。二次アークの発生閾値電流は列間電圧の上昇に伴い、低くなっていく傾向が見られた。また、外部容量が増えることによる二次アーク発生閾値の低下が確認された。このことは、静電容量の増加により PA 発生時のプラズマ密度が

増加し、アークが切れにくくなった可能性が理由として挙げられる。ただし、閾値低下が確認された条件(列間電圧 50V、70V)における持続時間は、10~20 μ sec 程度の比較的小さな TSA しか発生していない。以上の結果から、三重接合 GaAs 太陽電池(ギャップ長 1mm)の二次アーク閾値を決定した。結果を以下に示す。

- TSA 閾値 :

列間電圧 50V、列電流値 0.5A より大きく 1.0A 以下

- PSA 閾値 :

列間電圧 50V、列電流値 1.5A より大きく 2.0A 以下

5. 今後の課題

今回の実験により、二次アーク閾値が、外部コンデンサの値によって低下することが確認された。そのため、今後の WG1 試験では、軌道上における衛星の太陽電池パドル上で発生しうる、一次アークの最悪条件を模擬した試験ケースを新たに加える。

一次アークの電流波形は、放電点から広がった放電プラズマが、太陽電池パドル上のカバーガラスに蓄えられた電荷を中和しながら周りに広がっていく際の進展速度と、カバーガラスに蓄えられていた電荷量で決まる。パドルの大きさを 2.4m \times 8m、中和進展速度を 10km/s、放電時の電位差を 800V、カバーガラスの静電容量(接着剤層を含む)を 286nF/m²、放電点をパドル中心と考え、回路シミュレータを用いて、 R_{ext} , L_{ext} , C_{ext} の値を算出した。そして、回路シミュレータから算出した電流波形に近い電流波形を試験で模擬するために、LCR 回路を試験回路に接続して試験を行うことにした。その試験回路を図 11 に示す。

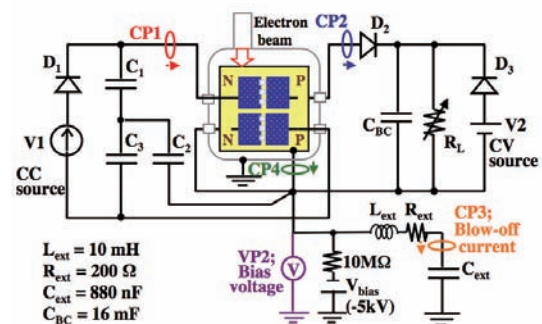


図 11 新試験回路

実際に図 11 の回路で得られた一次アーク波形を、回路シミュレータから得られた波形とともに図 12 に示す。

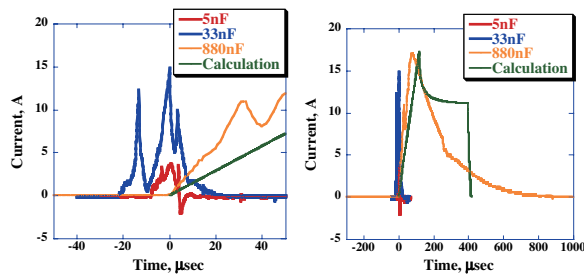


図 12 一次アーク電流波形比較

現時点では、計算結果から得た波形と全く同じ波形を作り出すことができないため、電流ピーク値とパルス幅、電荷量のみを合わせている。2.4m×8m のパドルで流れる一次アークの電流波形を用いて試験することで、この大きさのパドル以下のものについては、これから測定して二次アーク閾値が適用できる。ただし、持続放電は外部コンデンサの影響を受けないため、試験で得られた持続放電閾値については 2.4m×8m 以上のものについても適用できる。次に図 11 の回路図で新たに追加されたキャパシタンス C_{BP} について説明する。このキャパシタンスを取り付けることにしたのは、HOT 列で一次アークが発生した際、 V_1 電源が、列間に二次アークの電流を供給することができなくなっている現象を阻止するためである。これは、放電電流が、回路内の可変抵抗に流れることによって電位差が上昇していることが原因であると考えられる。そのため、列間電圧が上昇している間は二次アークに移行することがない。そこで、実際の人工衛星の電源部にも接続されているバスキャパシタンスを模擬したコンデンサを列間に接続することで、列間電圧の上昇を軽減させることにした。結果、 V_1 電流の減少も軽微なものとなった。これにより、二次アークの発生確率が上昇し、試験時間の短縮化につながると考える。

参考文献

- [1] Katz, I., Davis, V.A. and Snyder, D.B.: “Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO”, AIAA paper 98-1002, 36th Aerospace Science Meeting, Reno, (January 1998)
- [2] 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

- [3] D.Payan, “Risks of low voltage arcs sustained by the photovoltaic power of a satellite solar array during an electrostatic discharge. Solar Arrays Dynamic Simulator”, (2001)
- [4] 豊田和弘, 松本利明, 志方吉夫, 趙孟佑, 佐藤哲夫, 野崎幸重; 超高速インターネット衛星搭載用太陽電池アレイの地上試験、日本航空宇宙学会論文集、52(2004)、pp.328.-336
- [5] 麻生誠司, 趙孟佑; 低地球軌道プラズマ環境下での二次アーク発生条件、日本航空宇宙学会誌, 53(2005), pp.516-523
- [6] 北村倫基, 趙孟佑; 太陽電池アレイにおける持続放電現象の閾値取得方法、第 2 回宇宙環境シンポジウム, pp.138-144