

宇宙用太陽電池アレイ上での持続放電抑制法に関する研究

和田智博 増井博一 豊田和弘 趙孟佑

九州工業大学, 宇宙環境技術研究センター
福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

人工衛星は通信容量の増大、複数ミッションの搭載等によるミッションペイロード重量の増加、大電力化、長寿命化の方向に向かっている。この大電力化に伴って、太陽電池アレイ上での放電事故が確認されるようになった。太陽電池アレイで発生した放電は場合により太陽電池アレイの発電能力の低下や運用停止などの深刻な問題を引き起こした。本研究において、私たちはコーティング、電気振動及びシリコン系接着剤として用いられている RTV の形状を変化させることによる放電の抑制法を実験により調べた。それぞれの条件で発生する二次放電の発生確率を求めることで放電が抑制されていることを確認した。

Nomenclature

C_{ext}	: external capacitance
C_{BC}	: bypass capacitance
C_1	
C_2	: string capacitance
C_3	
CRD	: Current regulated diode source
I_{peak}	: peak current
I_{sc}	: short-circuit current of solar array
I_{ST}	: string current
R_b	: bias power supply protecting resistance
R_L	: load resistance
T_{start}	: start of blow-off current
T_{end}	: end of blow-off current
t_{arc}	: duration of TSA
V_1	: constant power supply voltage
V_2	
V_{ST}	: string voltage
V_{bias}	: bias voltage

1. 研究背景

現在、人工衛星は私たちにとって欠かすことのできないものである。静止気象衛星「ひまわり 6 号 (GMS-6)」は天気予報などの気象情報を送っている。また、地球観測衛星「だいち (ALOS)」は地形情報を正確に取得することができる。近年、人工衛星の高機能化や大型化、大電力化が必要となった。衛星の発電電力は 10kW 超の規模に達している。この様な大電力を効率的に運用するため、衛星のバス電圧は約 100V を採用している。しかし、人工衛星のバス電圧を増加させるに伴って、太陽電池アレイ表面上での放電事故が確認された。太陽電池アレイで発生した放電は場合により太陽電池アレイの発電能力低下や運用停止などの深刻な問題を引き起こした。そこで、地上実験により、太陽電池アレイで発生する放電現象を抑制する必要がある。

1.1 放電

宇宙機の電位は、宇宙機に流出入する電子のバランスによって決まる。日照中の通常状態において、光電子放出が機体電位及び機体表面の絶縁体電位をほぼ数 V に保つ。日陰中において、絶縁体電位は電子温度程度の負電位をもち、数 kV 近く負の電位をもつことがある。日照中であっても、磁気嵐 (サブストーム) に遭遇すると電位は大きく負に沈む。それは、高エネルギーの電子が多量に流入するためである。二次電子放出係数の違いにより、カバーガラス電位と衛星電位は乖離し、カバーガラス電位が機体電位を上回る逆電位勾配状況が作られる。さらに、トリプルジャンクションで電子が放出され、電界の向きとは逆の方向に誘導され、カバーガラス側面に衝突し、そこから二次電子が放出される。更に衛星電位とカバーガラスとの間の電位差が大きくなり、トリプルジャンクション近傍での電界が強められ、フィードバック効果によって、電界放出電流は増大する。電界放出電流が増えるにつれて、カバーガラス側面に叩く電子が増えるために、カバーガラス側面に吸着していたガスが脱離し、薄いガス層を形成する。そのガスの中で電離が起きて放電が発生する¹⁾。その後、カバーガラスの電荷が中和される。入射電子の流入により再帯電し、再び同じ過程を繰り返し放電に至る。このような単発の放電である静電気放電 ESD (Electrostatic discharge) がきっかけとなり、二次的な放電が引き起こされることから、単発の放電を一次放電 PA (Primary arc) と呼ぶ。一次放電のエネルギー源は、衛星と宇宙プラズマ間の静電容量と太陽電池アレイのカバーガラスに蓄えられた電荷による静電エネルギーである。なお、発生した放電プラズマは、放電点から、カバーガラスの電荷を中和しながら周囲に拡散する。さらに、一次放電が発生すると、太陽電池セルが損傷され、出力電力の低下も確認されている²⁾。一次放電は単発な現象であるが、これよりもさらに懸念されるのは一次放電が起因となり発生する持続放電である。太陽電池アレイは限られた面積に出来るだけ多く太陽電

池セルを敷き詰めるために、回路がパドル端で折り返されている。このため、正極端と負極端のギャップに 1 回路分の出力電圧差がかかる箇所が存在する。その近傍で一次放電が発生すると、放電プラズマを介して列同士が短絡し、永続的な電流が流れ続けることがある。これを二次放電 SA (Secondary arc) という (図 1)。

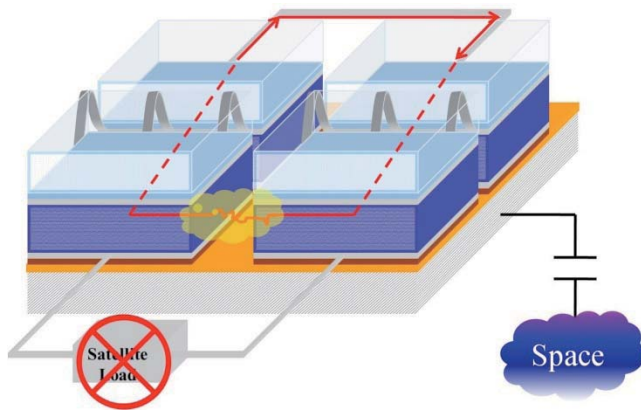


Fig. 1. Occurrence of secondary arc.

二次放電は PA 時に流れる電流 (ブローオフ電流) と I_{ST} により三種類に分類される。ブローオフ電流が終わる前に二次放電が終われば、その放電は NSA という。TSA と PSA はブローオフ電流が終わっても二次放電がおこり続けている放電である。詳細は図 2 に示す。

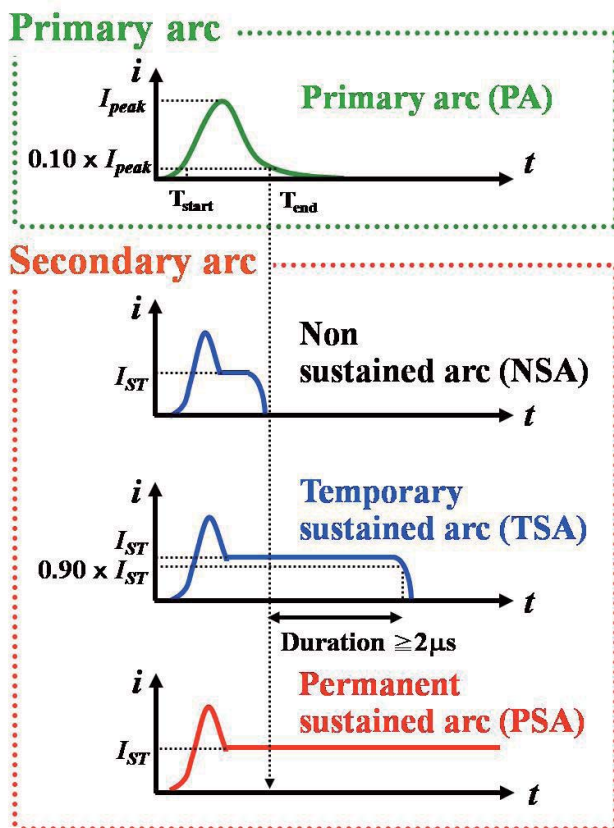


Fig. 2. Definition of arc current based on current waveform.

1.2 現在の放電抑制法

現在の放電の抑制方法はセルのギャップ間を RTV で埋めてしまうグラウティングという手法である (図 3)。グラウティングの放電抑制効果は実験的に示されている³⁾。しかし、グラウティングには欠点が存在し、十分な持続放電抑制法とは言えない。また、人工衛星を運用するにあたって欠点も数多く存在している。その欠点とは RTV 近傍で発生した放電によって RTV が揮発し、カバーガラスに付着することによって形成されたコンタミネーションによる発電電力の低下である。また、グラウティングはセルのギャップ間すべてに RTV を埋めているため、RTV の量は莫大なものとなり、人工衛星の重量が増大してしまう。次に、ギャップ間を埋めている RTV 内に存在するボイドやクラックは宇宙環境で放電の原因になるかもしれない。そのため、人の手によって除去されている。しかし全てのギャップ間に存在するボイドやクラックを除去するには多大な労働力が必要であり、人件費がかかる。最後に、宇宙環境で人工衛星の表面温度は 190K~360K まで変化する。RTV が宇宙環境の熱サイクルに耐えられるのか未だ解決されていない。持続放電を抑制するという観点においてはグラウティングによる持続放電抑制法は十分であるが、今現在上記に挙げた欠点に対する問題は解決されておらず、グラウティングに代替する持続放電抑制法を研究する必要がある。

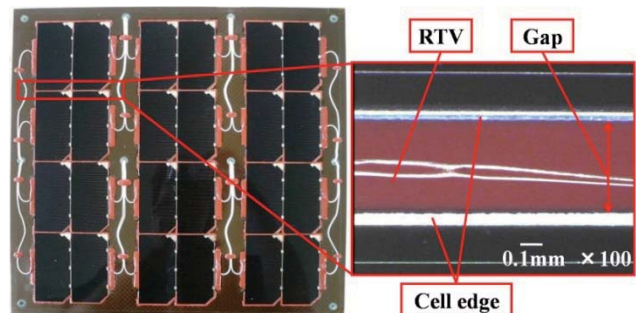


Fig. 3. RTV barrier between cells (grouting).

1.3 放電抑制法

本研究ではコーティングによる PA を抑制する手法と RTV の形状を変化させることによる持続放電の抑制法、そして電気的な振動を用いることによる SA の抑制法を試みた。コーティングによる PA の抑制法は太陽電池の列間にコーティング剤を塗ることによってギャップ間に存在するトリプルジャンクションを無くし、放電の抑制を試みたものである。RTV の形状変化による持続放電の抑制法は RTV の奥行きや高さを変化させることによって持続放電経路を形成させないことを試みたものである。そして、電気振動による SA の抑制法は試験回路にキャパシタンスやインダクタンスを導入することで放電電流に振動を与え、SA が発生したときの短絡電流を不安定化することにより SA の放電抑制を試みたものである。

2. 実験手法

本研究は真空チャンバーを使用した。到達圧力は 2.0×10^{-4} Pa である。図 4 に実験回路を示す。チャンバー上

部に電子ビーム銃 (ULVAC: RHEED) が取り付けられている。サブストーム時の高エネルギー電子を模擬することができる。電子ビームの最大加速電圧は 30kV、最大ビーム電流は 300 μ A である。チャンバー側面に ECR プラズマ源を搭載している。10¹¹m⁻³~10¹²m⁻³ 程度のプラズマ環境を作ることができる。V_{bias} (0V~60kV, 0A~10mA) (Glassman: EW60R10) を供給する高電圧電源はサブストーム時の衛星の負電位を模擬するために使用される。太陽電池アレイシミュレータ SAS (Agilent: E4351B) は太陽電池アレイの発電電力を模擬するために使用される。発電電力は R_L に供給される。CRD は低突入電流の負荷に対する応答速度を高速化している⁴⁾。C_{ext} は衛星で使用される全ての太陽電池に蓄積される電荷量である。これはチャンバーの中に全ての太陽電池を置くことができないために使用される。ストリングキャパシタンスはセル 30 直列分に含まれる寄生キャパシタンスであり、分布乗数論に基づいて計算された。C₁ と C₃ は 23 nF であり、C₂ は 400nF である。

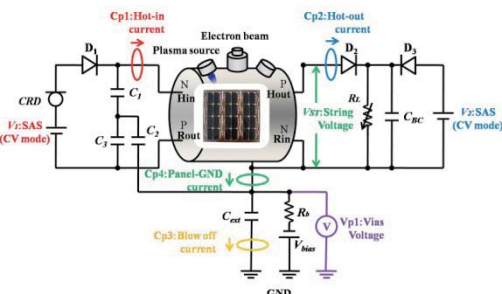


Fig. 4. Experimental circuit.

2.1 コーティングによる太陽電池

図 5 に示す太陽電池アレイクーポンはコーティング試験で使用した。図のクーポンには Si セルが使用されている。セルの大きさは 70mm x 35mm である。クーポンは Si セルが 4 枚直列に接続されている。その 4 枚の太陽電池セルが 3 列に配置されている。セルにはバイパスダイオードが取り付けられている。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ズシートを張っている。太陽電池セルの P バスバーと N バスバーはカプトンテープにより覆われている。コーティング剤は半導電性コーティング剤を使用しており、列間に刷毛で一往復塗っている。

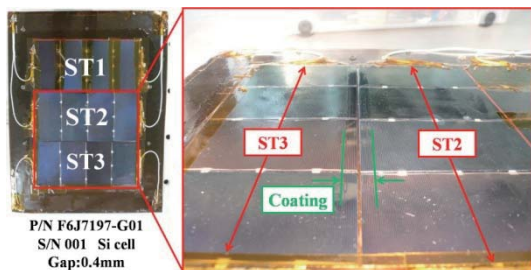


Fig. 5. Solar array coupon for coating.

図 6 は別のコーティングをした TJ セルクーポンである。TJ セルが二枚使用されている。列間のセルエッジは半導電性コーティング剤で 30 秒間浸してある。クーポン基盤はアルミ板にカプトンテープを貼ってある。その上にセルを乗せて、カプトンテープで固定してある。以下この

クーポンをコーティングサンプルと記す。

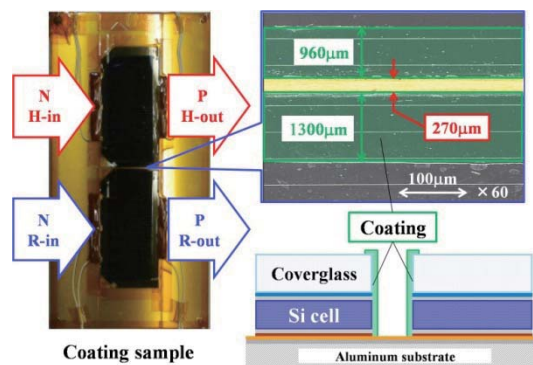


Fig. 6. Coating sample.

2.2 RTV 形状変化を模擬したサンプル

図7に示す模擬クーポンはRTV形状変化試験で使用した。カプトンテープはカバーガラスを模擬している。銅テープは電極を模擬している。スライドガラスはRTVを模擬している。図7に示してある箇所のスライドガラスの厚さや奥行きを変化させることでRTVの形状変化を模擬することができる。基板はアルミ板にカプトンフェーズシートを張ってある。表1にスライドガラスの厚さと奥行きの変化を記す。

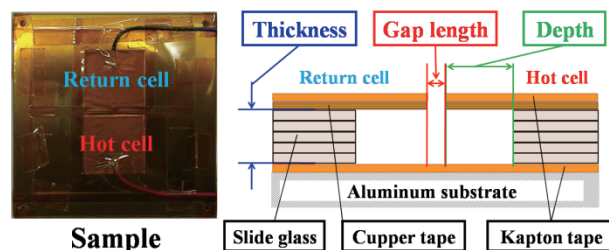


Fig. 7. Imitation coupon changed the position of glass slide.

Table 1. Imitation coupon samples parameter.

name	thickness	depth	Gap length
sample base	0.1 mm	0.0 mm	267 nm
sample 1	0.1 mm	2.0 mm	298 nm
sample 2	0.5 mm	0.0 mm	278 nm
sample 3	0.5 mm	2.0 mm	288 nm
sample 4	0.5 mm	4.0 mm	208 nm
sample 5	1.0 mm	0.5 mm	328 nm

2.3 RTV の形状を変化させたクーポン

図にRTVの形状を変化させたTJセルクーポンを示す。基盤の構造及びセルの配列はコーティングサンプルと同様である。TJセルはカプトンテープから0.5 mm浮かせてある。以下このクーポンをRTVサンプルとする。

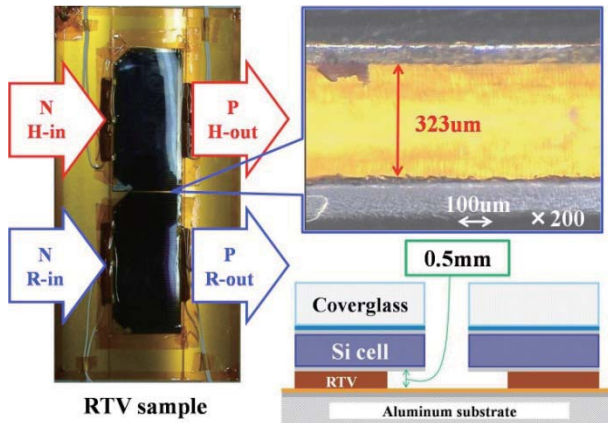


Fig. 8. RTV sample.

2.4 電気振動を利用した放電抑制

本研究で使用した実験回路を図9に示す。太陽電池の列間にキャパシタンス及びインダクタンスを入れることで放電が発生した際に電氣的な振動を発生させることができる。

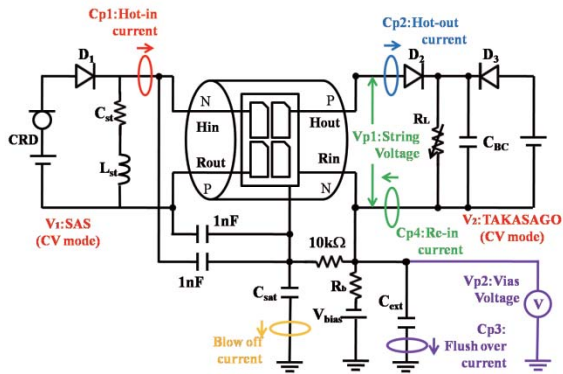


Fig. 9. Experimental circuit.

試験回路としてはブリーオフ電流とフラッシュオーバー電流の計測を行うためにブリーダー抵抗を介して計測を行っている。更に太陽電池と構体の間に存在する電荷が試験回路の長い配線上、早く抜けてしまうために1nFのキャパシタンスを挿入している。

実際に放電が発生した時の電流波形の原理図を図10及び図11に示す。本来、二次放電が発生した場合、Hot-inおよびHot-outに流れる電流波形は図10のようになる。しかし太陽電池の列間にキャパシタンスを挿入することで、放電時にキャパシタンスに蓄えられた電荷が放電電流となり流れることになる。その後、電流源から供給される電流はキャパシタンスに流れ込み放電が抑制される。

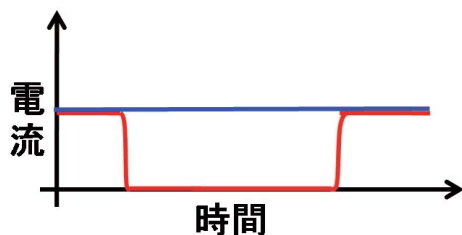


Fig. 10. Current waveform (No Capacitance).

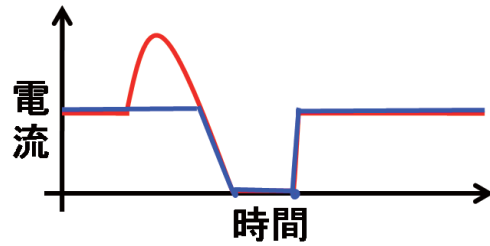


Fig. 11. Current waveform(There is capacitance).

3. 実験結果

表2にはコーティング試験パラメータを、表3にはRTV形状変化試験パラメータを記す。

Table 2. Experimental parameter for coating.

Sample name	P/N F6J7197-G01		Coating sample
Back Pressure	2.0x10 ⁻³ Pa~ 3.6x10 ⁻³ Pa	1.0x10 ⁻³ Pa~ 1.2x10 ⁻³ Pa	1.0x10 ⁻³ Pa~ 2.0x10 ⁻³ Pa
V_{bias}	-400 V~ -600 V	-5 kV	-5kV
C_{ext}	20 nF	5 nF	5 nF
R_b	100 kΩ	10 MΩ	10 MΩ
V_{ST}	100 V	100 V	100V
I_{sc}	0.5 A, 1.0 A	0.5 A, 1.0 A	1.0 A
Plasma density	5.09x10 ⁻¹² m ⁻³	-	-
Electron beam	Energy	-	5.0 keV 4.0 keV~ 5.0 keV
	Current	-	8μA~10μA 20μA~40μA

Table 3. Experimental parameter for changing the shape of RTV.

Sample name	Imitation coupon	RTV sample
Back Pressure	2.0x10 ⁻³ Pa~ 4.0x10 ⁻³ Pa	2.0x10 ⁻³ Pa~ 3.0x10 ⁻³ Pa
V_{bias}	-5 V	-5 V
C_{ext}	5 nF	5 nF
R_b	10 MΩ	10 MΩ
V_{ST}	50 V	50 V
I_{sc}	0.5 A, 1.0 A, 1.5 A, 2.0 A, 2.5 A, 3.0 A, 3.5 A	1.0 A 1.5 A 2.0 A
Electron beam	Energy	5.0 keV~ 7.0 keV
	Current	25 μA~75 μA 20 μA~40 μA

3.1 コーティングによるPAの抑制効果

実験において得られた結果を表4に示す。放電は全てギャップ間で起きたものである。

Table 4. Result of coating experiment.

Cell	Isc	Number of arcs in gap			Probability		
		PA	NSA	TSA	NSA	TSA	SA
P/N F6J7197-G01	0.5 A	0	0	0	0 %	0 %	0 %
	1.0 A	8	0	0	0 %	0 %	0 %
	0.5 A	8	0	0	0 %	0 %	0 %
	1.0 A	13	0	1	0 %	7 %	7 %
Coating sample	1.0 A	34	0	17	0	33 %	33 %

P/N F6J7197 に関して、TSA が一回、PA が 8 回発生した。TSA と PA は別の場所で発生した。図 12 に PA の放電箇所を、図 13 に TSA の放電箇所を示す。どちらの放電もコーティングのムラで発生した。

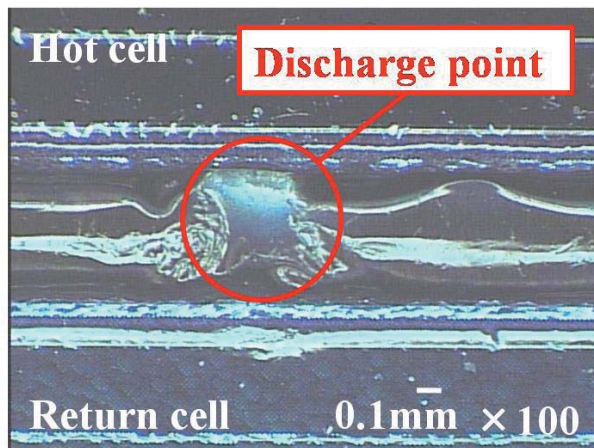


Fig. 12. Discharge point of PA.

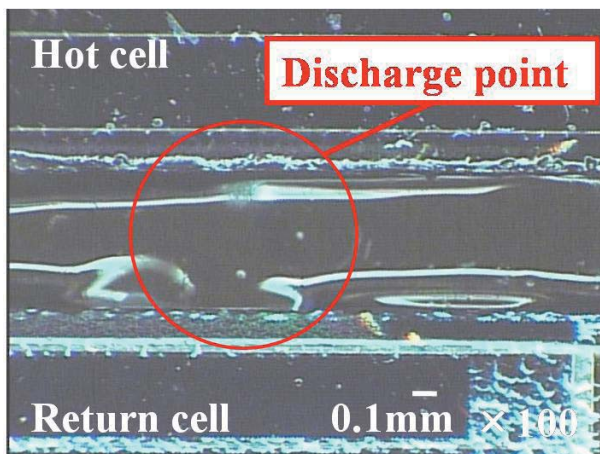


Fig. 13. Discharge point of TSA.

しかし、セルエッジをコーティング剤に浸したコーティングサンプルはセルエッジのクラックがある場所で PA が発生し、コーティング剤が剥がれることによって短絡経路が形成され TSA が発生した。放電前の写真を図 14 に、放電後の写真を図 15 に示す。

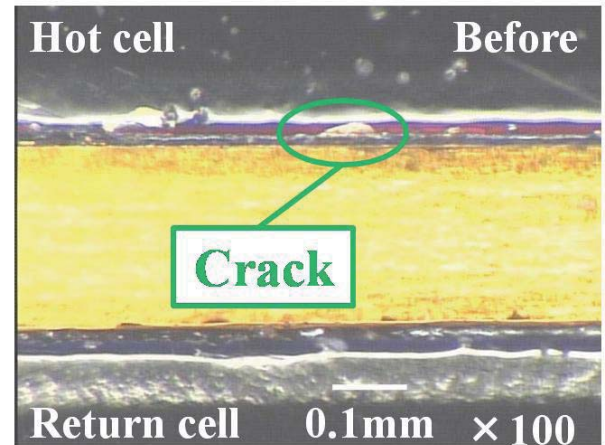


Fig. 14. Picture before the discharge (TSA) .

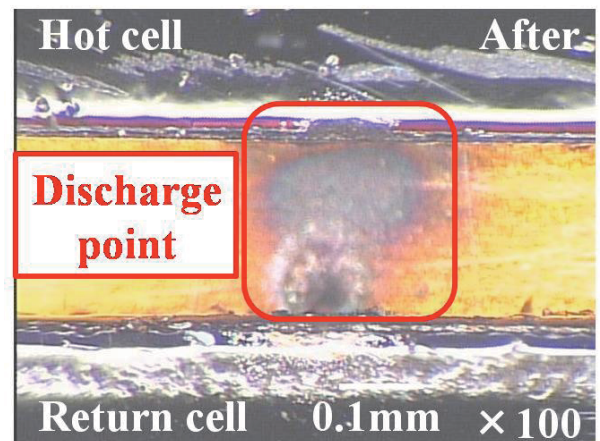


Fig. 15. Picture after the discharge (TSA) .

3.2 RTVを形状変化させたことによる PSA の抑制効果

本実験において、スライドガラスが 0.5mm 以上のサンプルでは持続放電は発生しなかった。しかし、スライドガラスの厚さが 0.1mm の場合、持続放電が発生した。図 16、17 に示すように、持続時間はサンプルの厚さや深さを変化させても影響はなかった。尚、エラーバーは標準偏差を表している。

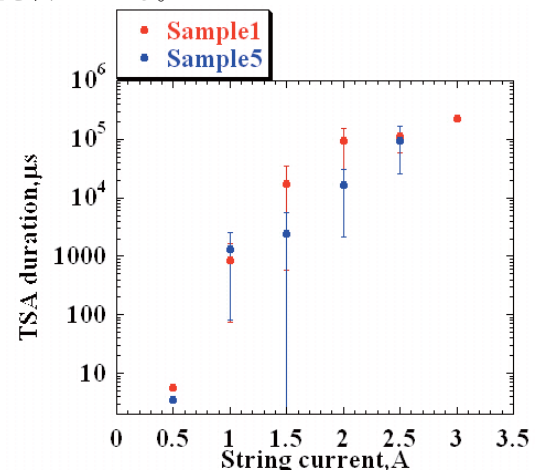


Fig. 16. TSA durations of Sample 1 and Sample 5.

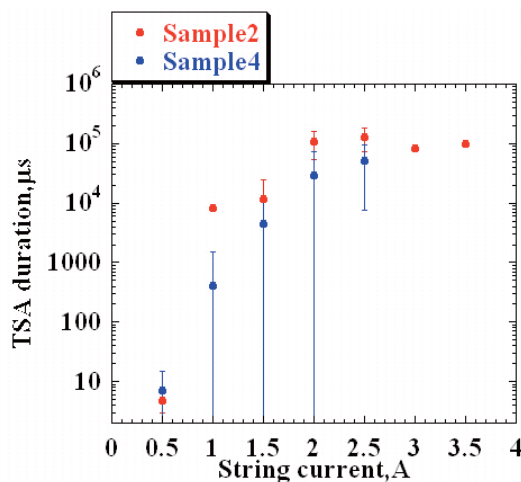


Fig. 17. TSA durations of Sample 2 and Sample 4.

また、各サンプルの Panel Ground、Return cell、Hot cell 間の抵抗値を測定した。測定結果を表 5 に示す。持続放電が発生したサンプルでは著しく抵抗値が低下している。しかし、厚さが 0.5mm 以上のサンプルではほとんど抵抗の降下は見られなかった。

Table 5. Resistance value of imitation coupon.

Sample name	Hot-GND	Return-GND	Gap
Sample base	2.4 k Ω	1000 M Ω	1 M Ω
sample 1	2.0 k Ω	38 k Ω	40 k Ω
sample 2	O.F.	O.F.	O.F.
sample 3	O.F.	1500 M Ω	O.F.
sample 4	O.F.	O.F.	O.F.
sample 5	O.F.	O.F.	O.F.

続いて、RTV サンプルでの試験結果を表に記す。各電流値に対して TSA は発生したものの PSA に移行することはなかった。

Table 6. Result of changing the shape of RTV.

Cell	Isc	Number of arcs in gap			Probability		
		PA	NSA	TSA	NSA	TSA	SA
RTV sample	1.0 A	10	0	6	0%	38 %	38 %
	1.5 A	8	0	2	0%	20 %	20 %
	2.0 A	6	0	3	0%	33 %	33 %

持続時間も 130ms を超える TSA が発生した。しかし PSA には移行しなかった。実験終了直後、模擬クーポンと同様に抵抗値を測定した。列間のみ抵抗値が 105k Ω に低下した。しかし、数分後再び計測すると 4.5k Ω に低下した。そこで、再び 2.0A の Isc を 1 分間流し、10 秒ごとに列間の抵抗値を計測した。図 18 に結果を記す。

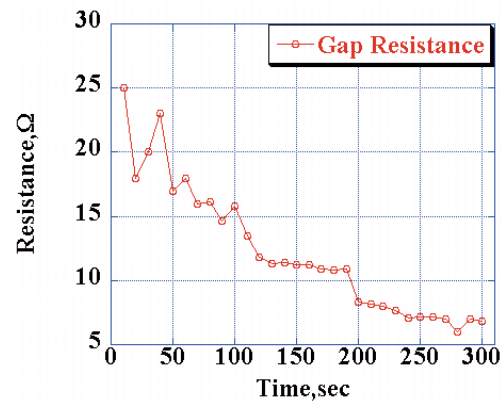


Fig. 18. Change in resistance value between cells.

時間とともに抵抗値が低下していることがわかる。おそらく長い TSA が発生すると、放電熱によって電極やセルが溶解し周りに拡散される。これは持続時間に依存し、長い TSA がおきると、多量の導電性物質が拡散されると思われる。拡散された導電性物質が短絡経路を形成する可能性がある。短絡経路が形成された放電箇所を図 19 に示す。

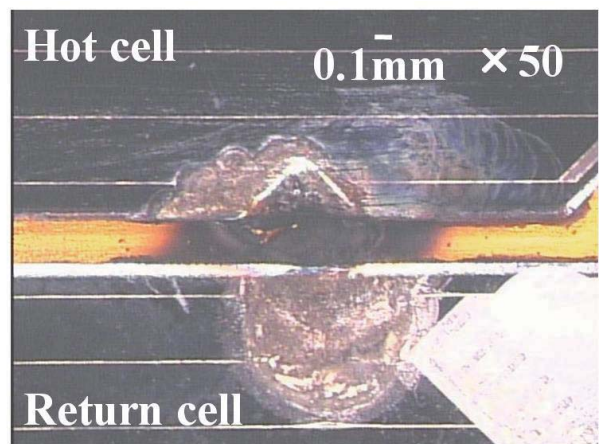


Fig. 19. Picture of gap with the resistance value decreased

3.3 電気振動による二次放電抑制

本研究で実際に得られた放電波形を図 20、21 に示す。図 20 は列間にキャパシタンスを挿入しないで実験を行ったものであり、図 21 はキャパシタンスを導入して実験を行ったものである。

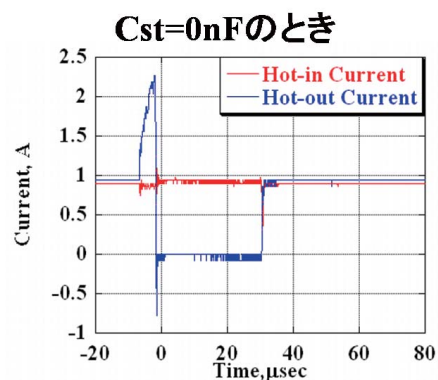


Fig. 20. Current waveform (No capacitance)

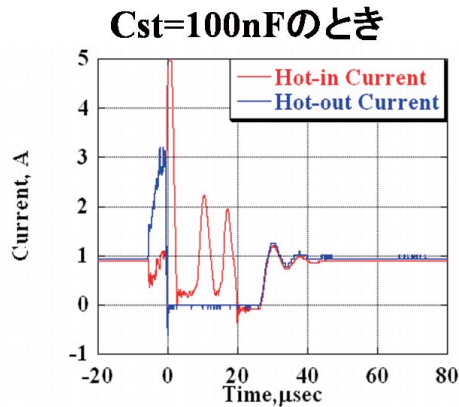


Fig. 21. Current waveform (There is capacitance)

図 20 と図 21 を比較してみると、キャパシタンスを導入した場合には放電後にキャパシタンスに電流が流れることによって放電電流が減少していることがわかる。実際にキャパシタンスを変化させて TSA と NSA の放電発生確率を計算したものを図 22 と図 23 に示す。

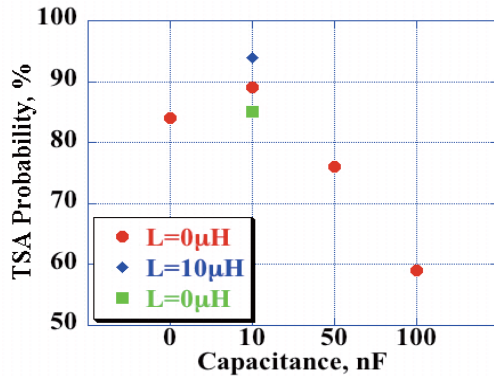


Fig. 22. Probability of TSA

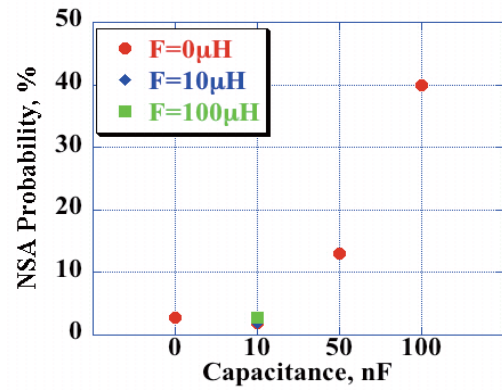


Fig. 23. Probability of NSA

大きな値のキャパシタンスを導入すれば TSA の発生確率は大幅に減少し、NSA の発生時間が大幅に増加していることがわかる。このことから、二次放電の持続時間はキャパシタンスを導入することで減少する傾向にあると考えられる。

4. まとめ

コーティング試験において、コーティングを施した場所で一次放電を抑制することができた。しかし、コーティングをした際にできるムラが放電箇所となり、TSA が発生してしまうことがわかった。RTV 形状変化試験では持続放電を抑制する RTV の厚さ求めることができた。しかし、長い持続時間の TSA が発生すると列間のみの抵抗値が降下することがわかった。放電熱により発生した導電性物質の拡散により短絡経路が形成された可能性がある。放電箇所を成分分析するなどの更なる研究が必要である。電気振動による二次放電抑制に関しては、太陽電池の列間にキャパシタンスを導入することで二次放電の持続時間を減少させることができると考えられる。

参考文献

- 1) Cho, M., Fujii, H.: Review on Charging and Discharging Phenomena in Space Environment: Arcing on High Voltage Solar Array and Future Issues, Aeronautical and Space Sciences Japan, Vol.51 (2003), pp.139-145.
- 2) Okumura, T., Masui, H., Toyoda, K., Cho, M., Imaizumi, M.: Electrical performance degradation with Si solar array for space craft, JSASS, 55 (2007), PP.590-596.
- 3) Cristopher F. Hoeber., Ernest A. Robertson., Ira Katz., V. A. Davis., David B. Snyder., : Solar Array Augmented Electrostatic Discharge in GEO, AIAA 98-1401, 1998.
- 4) Kitamura, K., Masui, H., Toyoda, K., and Cho, M.: Secondary Arc Tests on Solar Arrays for International standardization of ESD Test and Japanese Spacecraft Charging Guideline, 10th Spacecraft Charging Technology Conference, Biarritz, France, June 2007.