

低地球軌道環境における宇宙用太陽電池の放電による電気性能低下

Degradation of High Voltage Solar Array due to Arcing in LEO Plasma Environment

奥村 哲平*¹ 細田 聡史*¹ 金正浩*¹ 豊田 和弘*² 趙 孟佑*¹

Teppei Okumura, Satoshi Hosoda, Kim Joengho, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho

Key word: Solar cell, Arcing

Abstract: A degradation test for a solar array coupon against ESD was performed under stimulated Low Earth Orbit environment. All tests were performed in a vacuum chamber with a plasma source. A test coupon was biased at -400V with the aim of developing the next generation 400V high voltage solar array. The LCR circuit was used in order to simulate the arc current gathering the charge stored on coverglass. Tests were repeated until the solar array coupon was damaged. All of arc spots and waveforms were detected. The electrical performance of the coupon was measured after every test without opening the vacuum chamber. Many arcs occurred and caused the cell degradation. The cell was damaged by only one arc that occurred at the edge of cell, not at electrode.

1. はじめに

近年、人類の宇宙活動は長期化、大規模化の様相を呈してきている。それに伴い、宇宙機で必要とされる電力の需要も拡大の一途をたどっている。現在では数kW級の電力を必要とする人工衛星も増えており、現在建設中の国際宇宙ステーションでは65kWにも達する。発電電力が上昇することによって生じる送電線の重量増加、及びジュール損失を抑えるために、バス電圧を高くすることが必要不可欠である。そのため、kW級の宇宙機では100V以上のバス電圧が採用されるようになり、太陽電池アレイの発電電圧は100V以上になっている。国際宇宙ステーションは160Vで発電し、120Vで送電する方式がとられている。将来、宇宙太陽光発電衛星や宇宙工場のようにより大きな電力が必要と考えられる衛星が登場してくると、発電電圧

はさらに上昇し1MW級の衛星では400Vでの発電、送電が必要であると考えられている。

一般的に宇宙機の太陽電池アレイの負極は宇宙機の構体に接続されている。低地球軌道(LEO)には密度が約 $10^{12} \sim 10^{13} \text{m}^{-3}$ からなるプラズマが存在している。電子はイオンよりも移動度が大きいために宇宙機が周辺に存在するプラズマに対して負の電位を持つようになる。太陽電池アレイの正極側が周辺のプラズマとほぼ同じ電位を持った場合、負極と宇宙機の構体は正極に対して太陽電池アレイの発電電圧分だけ負の電位を持つ。発電電圧が上昇するにつれて、太陽電池アレイを含む宇宙機の大部分が周辺のプラズマに対して負に沈む。仮に太陽電池アレイを400Vで運用した場合、宇宙機の大部分は負に沈み、太陽電池アレイの負極部分では周辺のプラズマに対して-400Vの電位を持つことになる。

宇宙機が周辺プラズマに対して100~200Vの負電位を持つと、放電が発生することが確認されている⁽¹⁾。放電は太陽電池の劣化、電磁波による機器の誤動作、太陽電池アレイ回路の短絡事故を引き起こす危険性がある⁽²⁾。これら

*1 九州工業大学工学部電気工学科

*2 千葉大学工学部都市環境システム工学科

の事故の規模は発生する放電の頻度や規模によって異なる。図1に太陽電池アレイの断面図を示す。宇宙機が周辺のプラズマに対して負の電位を持つと、太陽電池セルとインターコネクタも負の電位を持つ、そのため、太陽電池アレイに対してプラズマからイオンが流入しカバーガラスの上面に衝突する。カバーガラスの上面は正に帯電してカバーガラス内に電界が発生する。この電界は、インターコネクタ、カバーガラス、プラズマの三者からなるトリプルジャンクションで強められる。これが原因となって電界電子放出により電子が発生し、放電にいたる。放電の規模は放電プラズマが取り込む電荷量に依存する。

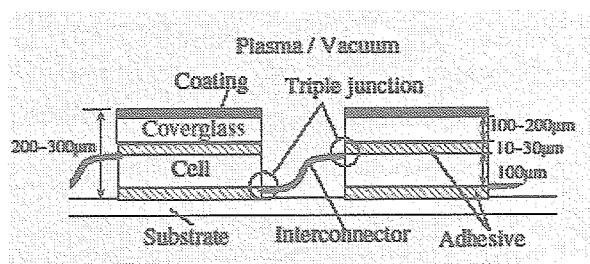


図1 太陽電池アレイの断面図

筆者らはこれまでLEOでの400V高電圧発電を目指した太陽電池アレイの開発をおこなってきた。その結果、太陽電池アレイの表面を透明フィルムで覆う方法が最も効果的な方法であることが判明した^(3,4)。しかしながら、デブリの衝突によりフィルムに穴が空くことも考えられ、このような状態となった場合放電を抑制することは困難となる。そのため放電が発生した場合、太陽電池セルが劣化するかどうか、どの程度の放電エネルギーによって太陽電池セルが劣化するのかがわかることが、太陽電池アレイの設計をおこなう上で重要となってくる。本研究の目的は400Vで発電をおこなった場合、太陽電池セルが放電によって劣化するかどうかを調べることである。

2.実験

2.1 実験システム

図2にこの実験で用いた実験システムの概念図を示す。実験に用いたチャンバーは長さ1.2m、直径1.2mである。チャンバーの最高到達圧力は 5×10^{-4} Pa程度であり、実験中は 1×10^{-2} Pa程度の圧力となる。チャンバー内のプラズマ環境はECRプラズマ源によって生成される。このプラズマ源は作動ガスとしてキセノンを用いている。実験の際はキセノンを流量0.2sccmとして用いる。このプラズマ

源によって生成されるプラズマの密度はクーボンの近傍で約 $3 \times 10^{12} \text{m}^{-3}$ 程度となり、電子温度は3~7eVとなっている⁽⁵⁾。実験中は軌道上を模擬して、クーボンは赤外線ランプによって40℃に保たれている。

クーボン上での放電による発光位置は放電位置特定システムによって測定される。実験中にビデオカメラによって撮影された映像はPCに接続されたハードディスクドライブに保存される。実験終了後、ハードディスクドライブに保存された映像をコンピュータプログラムを用いて解析することにより、個々の放電発生位置を特定することができる⁽⁶⁾。

実験中に発生した全ての放電の放電電圧、電流波形は高速データ取得システムによって計測される。このシステムはPCに市販の高速データ取得ボード(National Instruments社、NI5102)を取り付け、LabViewで作成したプログラムにより、30ms程度の時間間隔で波形を記録することができる。また、リアルタイムで放電電流波形のピーク値、電荷量、パルス幅を表示及び記録できる。

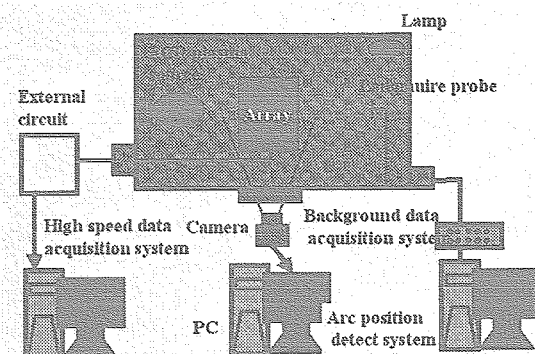


図2 実験システムの概念図

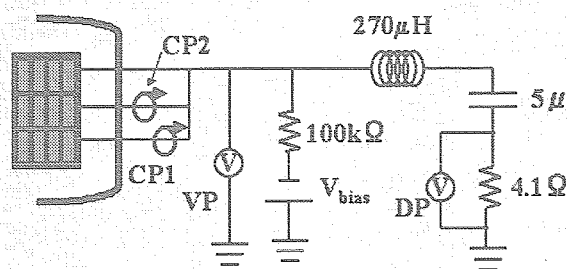


図3 放電電流操作を施した実験回路

実験回路は図3のものを用いる。この回路の定数は実際の低地球軌道上で発生する放電の電流波形を模擬するように決定した^(7,8)。電流プローブCP1、CP2には

HIOKI3274(DC~10MHz)を用いた。また差動プローブ DP によって V1 の電圧値を測定し、コンデンサから放電電流として供給された電流波形をもとめた。

太陽電池クーボンの電気出力はチャンバー内で測定することができる。測定に用いる光源はチャンバー内に設置されたメタルハライドランプである。太陽電池クーボンの電気性能はクーボンの列ごとにおこない、列につけた負荷を変化させた時の出力電圧、電流を測定する(VI 測定)。クーボンの出力電圧の最大値は取得した VI 特性から計算することが可能である。ランプの照度はクーボン上で 19000lux である。太陽電池セルは温度によって電気性能が変化するため、電気性能測定中はクーボンの温度も同時に測定し、計測後に補正する。

2.2 太陽電池アレイクーボン

図 4 に実験に用いた太陽電池アレイクーボンの概観図を示す。このクーボンは宇宙用 100V 発電太陽電池アレイの基本的なデザインである。サブストレートは炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を貼り付けた厚さ 25mm のアルミハニカムの上にカプトンフィルムを接着したものである。このクーボンに用いられている太陽電池は単結晶のシリコン太陽電池で、バイパスダイオードが組み込まれている。バイパスダイオードはセルが発電していない場合でも発電方向に電流を流すために組み込まれている。このクーボンの表面はカプトンフィルムで覆われおり、4 枚の太陽電池セルが直列に接続されたものが 3 列配置してある。直列方向に接続された太陽電池セルどうしはインターコネクタによって結ばれている。また列の両端の電極板をバスバーとよんでいる。列と列の間は RTV(Room Temperature Vulcanizing)シリコンゴムで埋められている。これは列間で発生する短絡現象(持続放電)を防ぐためである。

2.3 実験方法

実験の手順はまずチャンバー内においてクーボンの電気出力を測定する。電気出力を計測した後、プラズマを生成してクーボンに -400V の電圧を印加する。二十回程度の放電を確認した後にクーボンへの電圧印加をやめてプラズマ源も停止する。その後、放電による太陽電池セルへの影響を見るために、再びクーボンの電気出力を測定する。この操作一回を 1 ケースとする。この一連の操作をクーボンの電気出力が低下するまでおこなう。電気出力の低下を

確認するとクーボンチャンバーから出して電気出力が低下したセルの特定をおこなう。損傷した太陽電池を特定するために、クーボンにキセノンランプを光源とした光を照射してセル一枚ごとの開放電圧を測定する。

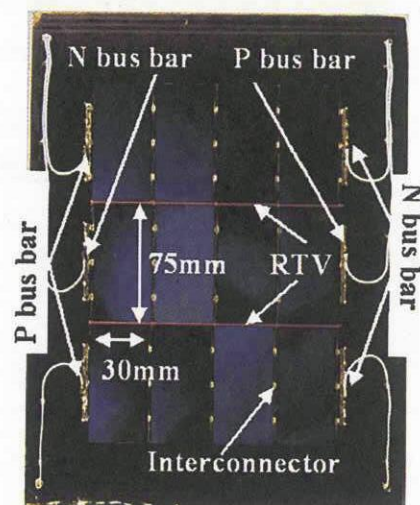


図 4 実験に用いた太陽電池アレイクーボン

3. 実験結果

実験は 10 ケースおこなった、総実験時間は 565 秒に相当する。この間に全体で 295 回の放電が発生した。ほとんどの放電はインターコネクタやバスバーなどの電極が露出した部分で発生した。しかしながら 26 回の放電が電極以外の太陽電池セル側面で発生した。この結果より、セル側面に比べて空間に暴露された電極面上では放電が発生しやすいことがわかる。

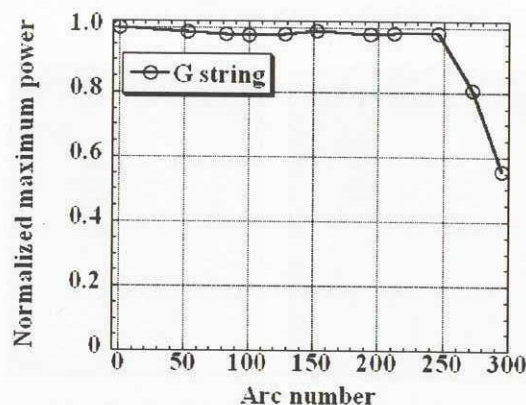


図 5 G 列における最大電力の推移

図 5 に G 列における各ケース終了後の出力電圧最大値の結果を示す。また、図 6 に正常な状態と電気性能に劣化が確認された時の G 列での電圧-電流特性のグラフを示す。図 6 から分かるように、電圧-電流特性の電圧値のみが低

下している。このことから、放電による太陽電池セルの劣化現象は、太陽電池セルのP電極とN電極が短絡することによって発生する事がわかる。縦軸は実験開始前に取得した出力電圧の最大値を1として規格化してある。図5よりケース9とケース10においてそれぞれ電力の低下が確認でき、40%の電力低下に至っていることがわかる。

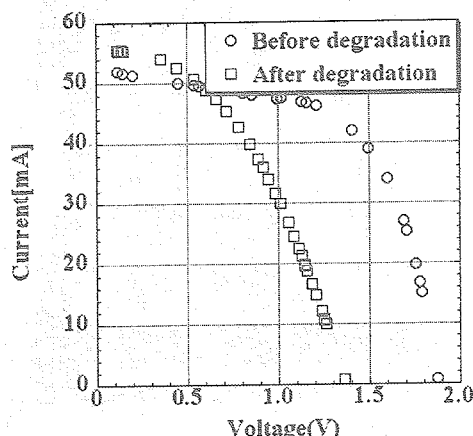


図6 劣化前、劣化後の電圧－電力特性

図7に電力が低下したケース9とケース10の放電発生位置を示す。G列で電気性能の低下が確認された時、太陽電池のセル角で放電が発生していた。G列ではケース9及び10の時のみセル角での放電が発生した。よってG列の電気性能低下の原因になったのは、ケース9及び10の時に発生したセル角の放電であると推測できる。ここで、G列において損傷したセルを特定するために、G列の各太陽電池セルの開放電圧を測定した。結果、セル1とセル2において大幅な開放電圧の低下が確認された。

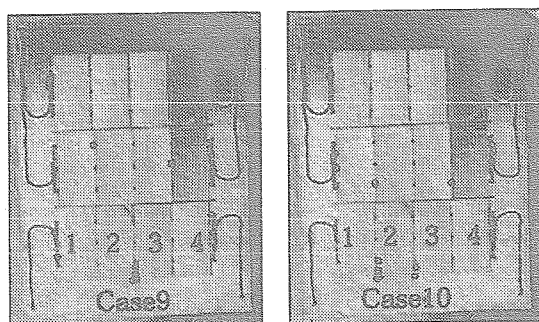


図7 G列の電気性能が劣化したときの放電発生箇所

3.1 漏れ電流発生箇所の探索方法

次に、セル1とセル2の劣化原因となったセルを特定するために、太陽電池セル上の漏れ電流発生箇所の探索をおこなった。まず、漏れ電流発生所の探索方法についての説

明をおこなう。図8に電流リーク箇所特定に用いたシステムの概念図を示す。通常、太陽電池は光を照射していない状態ではダイオードとして働く。そのためこの状態では太陽電池セルの電流阻止方向に電流を流しても、電流を流すことはできない。しかしながら、太陽電池セルが放電によって劣化した場合、太陽電池セルのP電極とN電極がなんらかの抵抗によって短絡されるため、光を照射していない状態で太陽電池セルの電流阻止方向に電流を流すと、放電による漏れ抵抗を介して電流は流れる。この時流れる電流によって生じるジュール熱を赤外線カメラによって検知する。赤外線カメラによって撮影された画像は、A/Dコンバータを用いてデジタル画像に変換されて、PCに記録される。

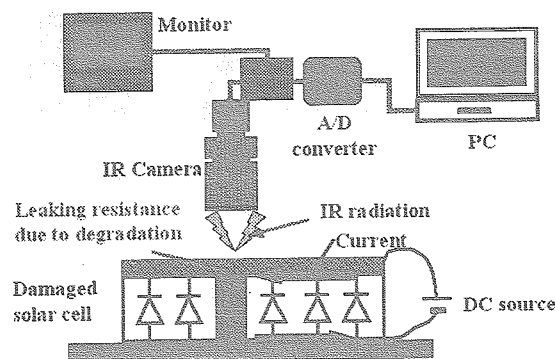


図8 漏れ電流発生箇所の特定システム

3.2 漏れ電流発生箇所

図9にセル2における漏れ電流発生箇所の探索結果を、図10に漏れ電流発生箇所付近の放電痕の顕微鏡写真を示す。図9の漏れ電流発生箇所は図10のアーク放電277によって付着した放電痕と一致している。よって、セル2を劣化させた放電は277回目に発生した放電が原因であることがわかった。セル1についても同様な方法で劣化の原因となった放電の特定をおこなったいずれの太陽電池セルも1回の放電で太陽電池セルの劣化が発生したことがわかった。図10に示した277回目の放電による放電痕は、外見上、N電極からセル側面に向かって放電痕が溶解、付着しているように観察できる。このことから、N電極の材質が溶解し、セル側面に付着してP電極とN電極を短絡させたという推測も立てられる。しかしながら、セル側面について成分分析等の解析をおこなっておらず、具体的にどのようにP電極とN電極が短絡したかは不明である。



図9 セル2における漏れ電流発生箇所

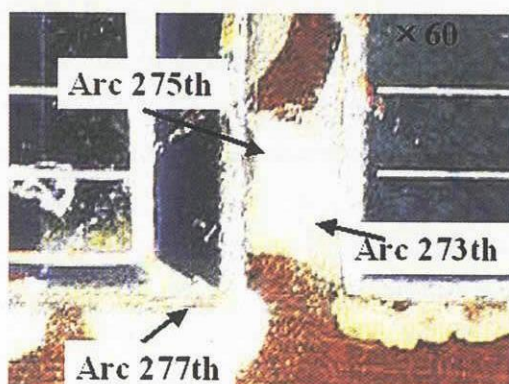


図10 漏れ電流発生箇所の放電痕

4. 考察

図11に太陽電池セルの劣化の原因となった放電の電流波形を示す。他の放電波形と比べて電流波形に特異な点は確認できなかった。そこで図12に放電電流の最大値と放電開始時のクーポンの電位の関係を示す。図12より放電開始時の電位が等しい場合、放電電流の最大値はセル角よりもバスバー、インターコネクタの方が大きいことがわかる。通常、放電電流の最大値は放電電流が流れる経路上の抵抗値で決まってくる。よってセル角で放電が発生した場合、その放電電流はバスバーやインターコネクタといった電極材上で発生した放電よりも大きな抵抗を持つと推測できる。

図13にアーク抵抗値と放電発生時の電位の関係を示す。図13から分かるように確かにセル角で発生した放電の方が大きな抵抗値を持っていることがわかる。これには陰極となる放電痕からの電子の放出されやすさが、空間に暴露されたインターコネクタやバスバーなどの電極上とセルと基盤に挟まれたセル裏面電極では違うことが原因の一つと考えられる。また、インターコネクタやバスバーで発

生した放電の放電痕はセル側面で発生した放電の放電痕よりも見かけの損傷具合が軽微だった。セル側面で放電が発生した放電による放電痕は陰極となった材質を融解したことから、セル側面で放電が発生した場合、放電がセルに与える熱負荷は大きいと考えられる。

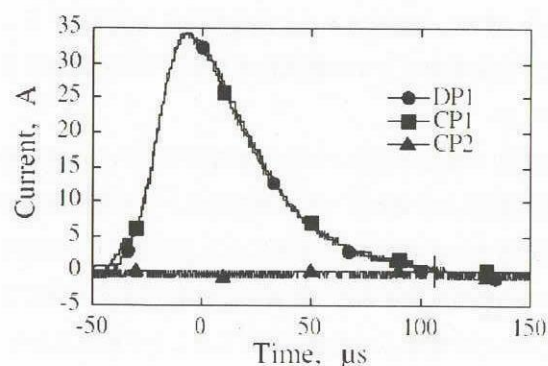


図11 劣化の原因となった放電の電流波形

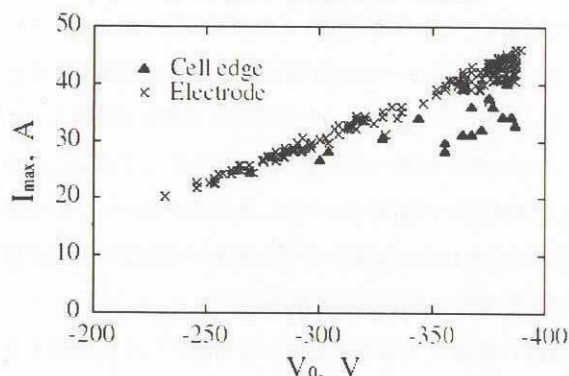


図12 電流最大値と放電開始時のアレイ電位

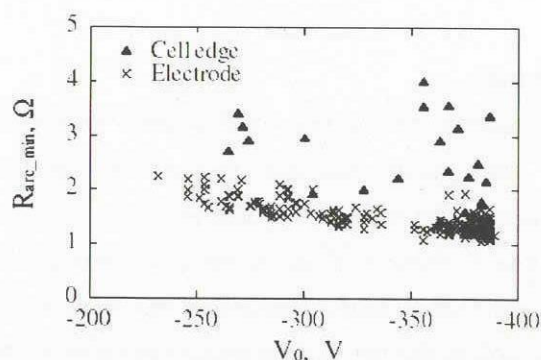


図13 抵抗値と放電開始時のアレイ電位

実際に400V発電を行う場合、放電抑制技術を適用しなければならない。しかし、放電の発生を完全に抑制することは困難である。そこで、放電により脆弱なセル側面をRTVで覆うなどの予備的な対策が必要と考えられる。

5. まとめ

低地球軌道環境を模擬した真空チャンバー内で、400V 発電宇宙用太陽電池アレイの放電劣化試験を行った。試験には放電プラズマがカバーガラスの帯電電荷を取り込みながら進展していく過程を模擬するために、外部 LCR 回路とし、放電電流モデルに沿うように放電電流波形の操作を行った。また、真空チャンバー内において大気開放することなく太陽電池アレイの電気性能を取得できる実験系を構築した。

-400V の電圧を印加された太陽電池アレイでは多数の放電が発生し、放電によって太陽電池アレイの電気性能が劣化することがわかった。劣化したセルを特定し、そのセルでのみ電流発生箇所を探索した結果、一回の放電によってセルの P 電極と N 電極が短絡したことが確認された。また、セル短絡を引き起こした放電は、空間に暴露した電極ではなく、セル側面で発生した放電であった。インターコネクタやバスバーでは放電による損害は確認できなかった。しかし、セル側面での放電では電極材が溶解し、セル・カバーガラス間への放電の進展が発生していることから、セル側面での放電ではセルに熱負荷が加わっている事がわかる。これらの結果からセル側面での放電でセルが故障する危険性があることが確認できた。

実際に軌道上で高電圧発電太陽電池アレイを使用するには、放電抑制技術の適用が第一条件であるが、放電の発生にそなえてセル側面での放電の発生を防ぐ必要がある。

参考文献

- [1] Grier, N. T. : Plasma Interaction Experiment II: Laboratory and Flight Results, Spacecraft Environmental Interaction Technology - 1983, NASA CP-2359, 1985, pp.333-347.
- [2] 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 Sciences Meeting, Reno, 1998.
- [3] 趙孟佑, 白石康, 豊田和弘, 匹田政幸: 低地球軌道用放電抑制型高電圧太陽電池アレイの基礎開発実験, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.50, No.581, 6月号(2002), pp.215-222
- [4] Toyoda, K., Saionji, A., Cho, M., and Hikita, M.: Experimental Study of Mitigation Arcs on High Voltage Solar Array in LEO, Proceedings of the 23rd International Symposium of Space Technology and Science, Matsue, Japan, 2002, pp.397-384
- [5] Hayashi, H., Saionji, A., Toyoda, K., Cho, M., and Kuninaka, H.: Development of Plasma Interaction Acceleration Test Facility for Study on Space Material Deterioration, 23rd Int. Symp. Space Tech. Sci. ISTS 2002-b-28, Matsue, Japan, 2002.
- [6] 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, Vol.51, No.589, 2月号(2003), pp.82-84
- [7] Cho, M., Ramasamy, R., Matsumoto, T., Toyoda, K., Nozaki, Y., Takahashi, M.: Laboratory Tests of 110-Volt Solar Arrays in Simulated Geosynchronous Orbit Environment, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.40, No.2 (2003), pp.211-220
- [8] Cho, M., Ramasamy, R., Toyoda, K., Nozaki, Y., Takahashi, M.: Laboratory Tests on 110-Volt Solar Arrays in Ion Thruster Plasma Environment, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.40, No.2(2003), pp.221-229.