

静止軌道プラズマ環境における太陽電池アレイ表面 での放電プラズマの帯電電荷取込み量の測定

学生員 松本 敏明* 学生員 志方 吉夫*
非会員 豊田 和弘* 正員 趙 孟佑*

Measurement of Charge Absorption by Arc Plasma on Solar Array Surface in GEO Plasma Environment

Toshiaki Matsumoto*, Student Member, Yoshio Shikata*, Student Member, Kazuhiro Toyoda*, Non-member
Mengu Cho*, Member

Late in 1990, a short circuit accident occurred on a GEO satellite due to sustained arc on high voltage solar array. The arc plasma generated by a trigger arc absorbs the electrical charge on coverglass and the conductivity increases. The high density arc plasma short-circuits the adjacent array strings and the solar array supplies the current to the trigger arc, that becomes the sustained arc. The purpose of this paper is to investigate the charge absorption by the arc plasma via a laboratory experiment. Solar array coupons are irradiated by an energetic electron beam in a vacuum chamber. The amount of charge absorbed by the arc plasma is proportional to the differential voltage before the arc. When the initial energy of the trigger arc is small, the charge absorption depends on the distribution of surface potential.

キーワード：太陽電池アレイ，トリガーク，乖離電圧，放電プラズマ

Keywords : solar array, trigger arc, differential voltage, arc plasma

1. 目的と背景

静止軌道（以後 GEO）での宇宙活動において，打ち上げコスト削減のために宇宙機の大型化や運用長期化が進められ，宇宙機の消費電力は最大で 10 kW に達するようになった⁽¹⁾。大電力を宇宙機で使用する場合，配電システムにおける電力損失やケーブルの質量の軽減を考慮すれば，高電圧での送電が合理的である。そのため，従来の宇宙機は 28～50 V で送電を行っていたが，大電力化が進むにつれ一部の宇宙機では 100 V を超える高電圧での送電が開始されている。しかしながら，太陽電池アレイの高電圧化に伴い，持続放電と呼ばれる現象による太陽電池アレイの短絡事故が 1990 年代後半以降確認されようになった⁽²⁾。

宇宙空間では，プラズマ電位を基準（零）電位としている。宇宙機が周辺プラズマに対して持つ電位は，宇宙機に流入する電子や正イオン，表面から放出される光電子や二次電子のバランスにより決定される。GEO 環境において，夜間では電子と正イオンの質量の違いから，宇宙機の大部

分が負電位を持たなければ電流のバランスをとることが出来ない。このため，宇宙機は周辺プラズマ電位に対して負の電位を持つ。一方，サブストーム（磁気嵐）⁽³⁾等が起きていない静穏なプラズマ状態における日照時は，光電効果により宇宙機表面から放出される数 eV の光電子を抑制するために，宇宙機電位はほぼ零となる。しかし日照中であっても，サブストーム時に高エネルギー電子が宇宙機に流入すると，宇宙機電位は日照具合によっては高エネルギー電子と宇宙機表面から放出される二次電子が支配的となって，数 kV 程度の負に沈む可能性がある。また，太陽電池アレイのカバーガラス等の絶縁体表面は導体部と同様に負電位を持つが，二次電子放出係数の違いから導体部の電位よりも正になることがある。このような電位構造は，通常よく観測される場合と逆であることから「逆電位勾配」と呼ばれる。以後，本論文では太陽電池アレイにおけるカバーガラスと導体部との電位差を乖離電圧と呼ぶ。

図 1 に太陽電池アレイの断面図を示す。カバーガラスがセル導体部やインタコネクタ等に対して正電位を持つと，導体，絶縁体，空間の接するトリプルジャンクションと呼ばれる場所で電界集中が起きて，トリガークが発生する⁽⁴⁾。トリガークは短時間のパルス状放電であるが，後述する

* 九州工業大学
〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1
Kyushu Institute of Technology
1-1 Sensui, Tobata-ku, Kitakyushu 804-8550

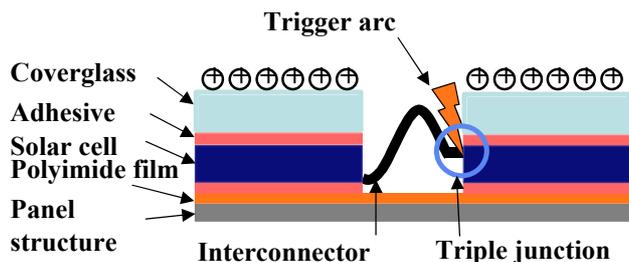


図 1 太陽電池アレイの断面図

Fig. 1. Cross sectional view of solar array.

持続放電の引き金となることからトリガークと呼ばれている。以下に、トリガークが持続放電に移行するメカニズムについて簡単に要点だけを述べる。詳しくは文献(5)に記載されている。

発生直後のトリガークは、宇宙機が宇宙空間に対して持つキャパシタンス (数 100 pF) と電位の積で与えられる電荷をエネルギー源としている。トリガーク発生時には、アーク発生点から放電プラズマ中の負電荷が四方に拡散する。この時、宇宙機には正電荷が流入し、宇宙機電位が周辺プラズマ電位付近まで上昇する。カバーガラスは宇宙機電位よりも正電位であるため、カバーガラス表面には正電位領域が形成される。拡散した放電プラズマ中の電子は、カバーガラス表面の正電位領域に引き寄せられて、両者が結合する。この結合により、カバーガラス表面に蓄えられていた帯電電荷は放電電流としてトリガーク発生点に流入する。放電プラズマがカバーガラスの帯電電荷を取込むために、放電後の乖離電圧は小さくなる。このように、放電プラズマが拡散した時のトリガークは、カバーガラスに蓄えられた帯電電荷をエネルギー源とする。

カバーガラスに蓄えられる帯電電荷量は、カバーガラスをコンデンサとして考えると、乖離電圧でこのコンデンサを充電した時の電荷量にあたる。100 V で運用される大型衛星では、搭載される数万枚のカバーガラスの容量は 10 μ F を超える。

トリガーク時に発生した放電プラズマの導電率は、カバーガラスの帯電電荷を取り込むことで上昇する。この高密度放電プラズマは、異なった電位を持つセル同士を短絡して電流ループを形成する。この時、短絡したセル間の電圧が高いと、放電プラズマが太陽電池アレイ自身から数 A の短絡電流を供給されて、放電が持続する。このように、トリガークが太陽電池アレイ自身の電流により持続する現象を持続放電と呼ぶ。

しかし、放電プラズマがどれほどの範囲まで帯電電荷を取込み、どれほどの拡散速度であるかは十分に解明されていない。ボーイング社の P. Leung⁽⁶⁾らは、発生したトリガークがどの程度の規模に成長するか調べるために、770 \times 665 mm のサイズの太陽電池アレイクーポンパネルを使った地上試験を行っている。クーポンパネルとは実際の太陽電池アレイパネルが数 m のサイズがあるのに対し、真空チャ

ンバー内で実験が行えるように太陽電池の数を少なくした太陽電池アレイパネルの縮小版を意味する。製造方法は実際の太陽電池アレイパネルとできるだけ同じ方法を用いている。試験では、トリガーク時の放電プラズマの拡散速度がおおよそ 9×10^3 m/s であることを放電電流波形から推定した。更に、試験結果を実機の太陽電池アレイパネルに外挿し、実機での放電電流波形を推定している。本論文では放電プラズマの拡散速度ではなく、帯電電荷取込み量と放電前の帯電状態の関係等について調べる。

一度持続放電が起こると、最悪の場合、太陽電池セルの下面の絶縁材料であるポリイミドの高分子シート (図 1 参照) が炭化してしまい、太陽電池セルと太陽電池パネル構造体 (図 1 参照) が短絡し大規模な電力損失を招いてしまう。トリガークが持続放電に移行する条件は、太陽電池アレイの列間電圧と、トリガーク時の放電プラズマの導電率すなわち放電エネルギー等で決められる。そのため、放電プラズマがどの程度の規模まで成長し放電エネルギーがどれくらいとなるかを知ることは、持続放電防止のための太陽電池アレイの設計指針を決定する上で重要である。

本論文の目的は、トリガーク時に発生する放電プラズマがどのくらいの範囲でどの程度の帯電電荷を取込むのかを検討することにある。具体的には、真空チャンバー内に太陽電池アレイクーポンパネル (以下クーポンと略す) を配置して、放電プラズマの帯電電荷取込み量を調べた。試験においては、放電プラズマの帯電電荷取込み量が、放電前の乖離電圧、電位分布、放電初期に放出される電荷量、カバーガラスの材質に対してどのような依存性を持つのか調べた。第 2 章で実験方法の詳細を述べ、第 3 章で実験結果を述べる。更に、第 4 章で実験結果の考察を行い、第 5 章では、結果をまとめる。

2. 実験方法

図 2 に本試験で使用したクーポンの写真を示す。クーポンのサイズは 210 \times 240 mm で、1 つのセルは 70 \times 35 mm である。アレイ回路として 5 つのセルを直列にしたものを 3 並列に配置している。今回は、Si 製太陽電池セルでカバーガラスの材質が CMX、GaAs 製セルでカバーガラスが CMG の 2 種類のクーポンを使用した。カバーガラス下の接着剤は CMG、CMX 共に同じものであり、接着剤とカバーガラスを合わせた厚みは 0.15 mm であり、キャパシタンスは 1 mm² あたり 0.3 pF である。通常、カバーガラスの種類は、使用する太陽電池セルと熱膨張係数が等しくなるようにして決められる。CMG、CMX はタレス社のカバーガラスの商品名であり、ホウケイ酸ガラスの 1 種であること以外は詳細な組成等は公表されていないが、比誘電率は共に 7.2 である。また 40 $^{\circ}$ C での導電率を帯電電荷の減衰から測定したところ、それぞれ CMG が 1.9×10^{-13} S/m、CMX が 9.5×10^{-13} S/m という値が得られている⁽⁷⁾。但し、これらの値は接着剤層を含んだ値である。表面は CMX が BRR(Blue Red Reflection)コーティングであり、CMG が AR(Anti Reflection)コーティング

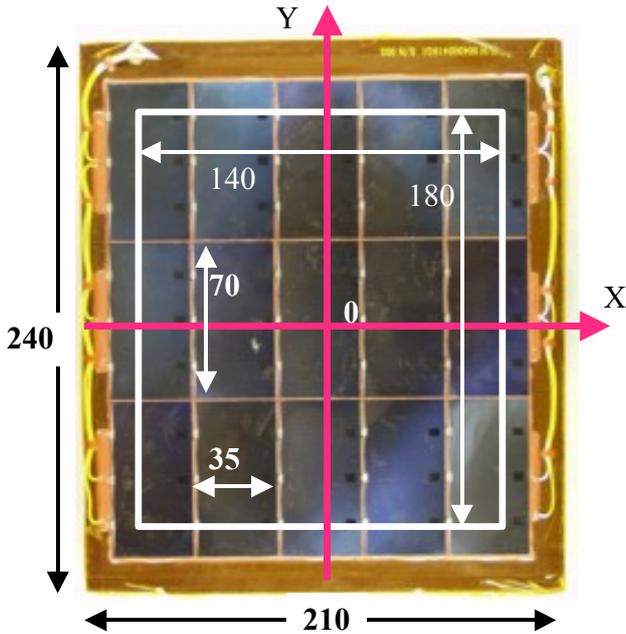


図2 太陽電池アレイクーポンパネルの写真(帯電電位測定範囲を白枠で示す;サイズはmm)

Fig. 2. Photograph of solar array coupon (the area of potential measurement is shown in a white box, size is in mm).

である。2次電子係数はコーティング材に強く依存するが、残念ながらこれらのデータは不明である。

クーポンの構造体部はアルミハニカム板とCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)からなり、その上に絶縁層としてのポリイミドシートを貼り、更に太陽電池をポリイミドシートの上に接着している。又、このクーポンは太陽電池だけでなく、構造体部にも電圧を印加する事が可能である。サブストーム時に宇宙機は負電位を持つので、試験中は構造体部にも負電圧を印加している。

図7に試験システムを示す。本試験に使用した真空チャンバーは直径600mm、長さ900mmである。図2には示していないが、チャンバーには拡散型プラズマ源を取り付けており、クーポン表面の初期帯電電荷を除電する際に使用している。尚、動作ガスはArガスである。真空チャンバーは接地されている。試験中の真空チャンバー内の温度は、軌道上での日照中を模擬して赤外線ランプを使用して40℃に保った。チャンバー温度はクーポンを置いた台の温度を熱電対でモニタした。サブストーム時のマイナス数kVの衛星電位を模擬するため、太陽電池とクーポン構造体部に直流電源(Glassman; EW60R10)により-6kVの電圧を印加した。セルを直列につないだアレイ回路の正極端と負極端は短絡し、クーポン構造体からの端子とまとめて単一の直流電源につないでいる。外部キャパシタンス C_{ext} は、宇宙機が空間に対して持つキャパシタンスを模擬している。放電発生時にクーポンに流れる放電電流を電流プローブ(SONY Tektronix; P6022)を用いて、又、アレイ回路とク

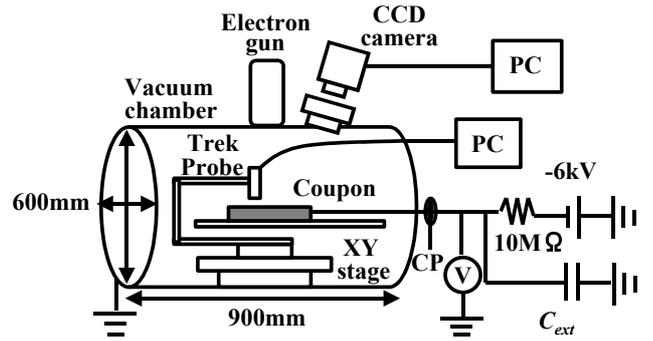


図3 実験システム

Fig. 3. Experimental system.

ポン構造体の電位を高電圧プローブ(SONY Tektronix; P6015A)によって計測し、それらをオシロスコープ(SONY Tektronix; TDS224)で測定した。放電が発生すると、放電プラズマが放電発生点とチャンパー壁間に電流路を形成し、接地及び外部キャパシタンスを介した電流ループが形成される。放電発生初期においては、外部キャパシタンスの電荷がクーポン表面から放出されることになる。その後放電プラズマ中の電子がカバーガラス表面の帯電電荷を取り込むことになる。但し、図3に示した設定では、カバーガラス表面の帯電電荷が取込まれることによる電流は計測できない。

静電加速型電子ビーム銃(ULVAC; RHEED)より高エネルギー電子を照射することでカバーガラスを-6kVよりも正に帯電させ、作り出した乖離電圧によってトリガアークを発生させた。ビーム方向は固定である。照射電子のエネルギーを E_{beam} であらわす。 $E_{beam}=6\text{ keV}$ の時の電子電流密度は、クーポンの中心部で 17 mA/m^2 程度である。クーポンが置かれている場所に接地したターゲットを置いて計測したビームの拡がりの半値幅は、 $E_{beam}=6\text{ keV}$ で約60mmである。また、若干のサイドローブも有している。

電子エネルギーが3.5keVと4keVの場合には、表面電位が-4kVよりも正になるまで照射電子がクーポン表面に届かないので、二次電子放出による帯電でなくビーム電子によりわずかに電離された正イオンによって帯電している。チャンパー内のガス密度は $1.9 \times 10^{17}\text{ m}^{-3}$ 程度あるが、電子がアレイ表面に達する迄にわずかながらこれらのガスを電離する。電離によって生じた2次イオンがアレイ表面の負電位に引き寄せられて帯電する。このような時に、定常状態でのカバーガラスの乖離電圧は外から流入する電流密度とガラス及び接着剤の厚さ d 及び導電率 σ で決まるので、以下の式を使って乖離電圧を測定する事でイオン電流密度 j_{ion} を測定した。

$$j_{ion} = \sigma \frac{\Delta V}{d} \dots\dots\dots(1)$$

この結果、イオン電流密度はガス密度が $1.9 \times 10^{17}\text{ m}^{-3}$ の状態では、 $E_{beam}=3.5\text{ keV}$ で $2.3\text{ }\mu\text{A/m}^2$ 、 $E_{beam}=4\text{ keV}$ で $0.8\text{ }\mu\text{A/m}^2$ 程度であることがわかっている。3.5keVや4keVのエネル

表 1 実験条件

Table 1. Conditions of experiment.

No	Coverglass	Electron beam energy, V_{be} [keV]	External capacitance, C_{ext} [pF]	Number of arcs
1	CMG	4	300	4
2	CMG	4, 6	300	8
3	CMG	4, 6	300, 2000, 20000	16
4	CMG, CMX	3.5	300	14

ギーを用いた理由であるが、-6 kV の印加電圧に対してこれらのエネルギーでよく放電が起きることが経験的に分かっていたからである。

作り出した乖離電圧は、ステッピングモータ駆動の XY ステージ (シグマ光機; SGSP26-150_200) に配置した表面電位計 (Trek; MODEL341) で 2 次的に測定した表面電位と印加電圧の差から求めた。トリガアークの発生箇所は、CCD カメラ (Edmund; CVC-6811LN) によりトリガアーク発生時の発光を撮ることで特定した。表面電位の測定範囲は、図 6 に示すようにクーポンの中心から並列方向に ±90mm, 直列方向に ±70mm で、10mm 間隔で測定していて、1 回の測定で 285 点のデータを得る。尚、表面電位計の空間分解能は約 10mm である。1 回の測定にかかる時間は 8 分であり、その間電位は最大で CMG が 800V, CMX が 1100V 減衰する。そのため、表面電位を測定する場合はこの減衰を考慮に入れて補正している。即ち、各測定点において測定開始からの時間を記録しておき、その時間分の減衰を減衰曲線から求め補正した。尚、便宜上、クーポンの並列方向を Y 方向、直列方向を X 方向とした。クーポンは、電子ビーム銃をチャンパー真上から照射するためにアレイ表面が上向きになるように、かつ、クーポンの中心が電子ビーム銃の真下にくるように配置した。

次に放電プラズマの帯電電荷取込み量の測定方法について述べる。まず、最初に帯電電荷を除電した状態のクーポンに電子ビームを照射し、カバーガラスを帯電させて、トリガアークを発生させる。トリガアーク発生後、直ちに電子ビーム銃を切り、表面電位分布を測定する。これが放電後の帯電電位分布である。又、この時同時に電子ビームを照射した時間も記録しておく。次に、帯電電荷を除電し、カバーガラス表面の状態をビーム照射前と同じにする。次に、先程記録していた時間だけ電子ビームを照射し、照射後の表面電位分布を測定する。これが放電前の帯電電位分布である。尚、電子ビームの照射時間が同じ場合に照射後のカバーガラスの表面電位分布に再現性があることを確認済みである。放電プラズマの帯電電荷取込み量は、放電前後の乖離電圧の差分とカバーガラスのキャパシタンスの積で与えられる。放電プラズマの帯電電荷取込み量を Q_{ab} 、帯電電荷取込み率を R_q とし、それぞれ次式で定義する。

$$Q_{ab} = C_{cg} (\Delta V_b - \Delta V_a) \dots\dots\dots (2)$$

$$R_q = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_b} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 C_{cg} はカバーガラスの単位面積あたりのキャパシタンス、 ΔV_b は放電前の乖離電圧、 ΔV_a は放電後の乖離電圧である。

表 1 に実験条件を示す。表 1 に示すアーク数とは各実験中に観測したアーク数のことである。表面電位の測定はアークが発生する毎に行っており、1 回の測定で 285 点でのデータを得る。実験 1 では、クーポン表面の各点について帯電電荷取込み量の放電前の乖離電圧に対する依存性を調べた。実験 2 では、帯電電荷の取込みが放電前の表面電位分布にどう依存するかを調べるために、照射電子のエネルギーを変えて表面電位分布を変えた。実験 3 では外部キャパシタンスを 300 pF, 2 nF, 20 nF と変えていき、放電プラズマの取込む電荷量が、放電時初期の放出電荷量にどう依存しているかを調べた。トリガアーク初期に放電発生点から放出される放電プラズマの電荷量は、空間に対して持つ宇宙機の電位とキャパシタンスの積で与えられる。サブストーム時の宇宙機電位は最悪で -40 kV に達する場合もある⁽⁸⁾。宇宙機を真空中に置かれた半径 3 m の導体球で近似すれば、無限遠に対する静電容量は 333 pF となる。このことから、初期放出電荷量も最大でおよそ 10 μC に達するものと思われる。実験 4 においては、CMG, CMX の 2 種類を用いて、カバーガラスの材質が放電プラズマの帯電電荷取込み量に依存しているかを調べた。

3. 試験結果

〈3・1〉 放電前の乖離電圧に対する依存性 図 4 に実験 1 において CMG クーポンに 4 keV の電子を照射した時の放電前の乖離電圧、放電プラズマの帯電電荷取込み量、及び帯電電荷取込み率の分布図を示す。図 4 は 1 発の放電の前後のデータである。図中の x 方向、y 方向は図 2 に示される通りである。放電前の乖離電圧はクーポン中心付近をピークとした一つの山を作っている。放電前には最大で 2kV 以上の乖離電圧があるが、放電後は殆ど無くなっている。放電前の乖離電圧のパターンと取込み量のパターンはほぼ一致しており、取込み率の分布ではほぼ様になっている。これらの分布は観測した 4 発の放電全てに共通しており、データの再現性はよい。

一発の放電で計測した 285 点において放電前の乖離電圧

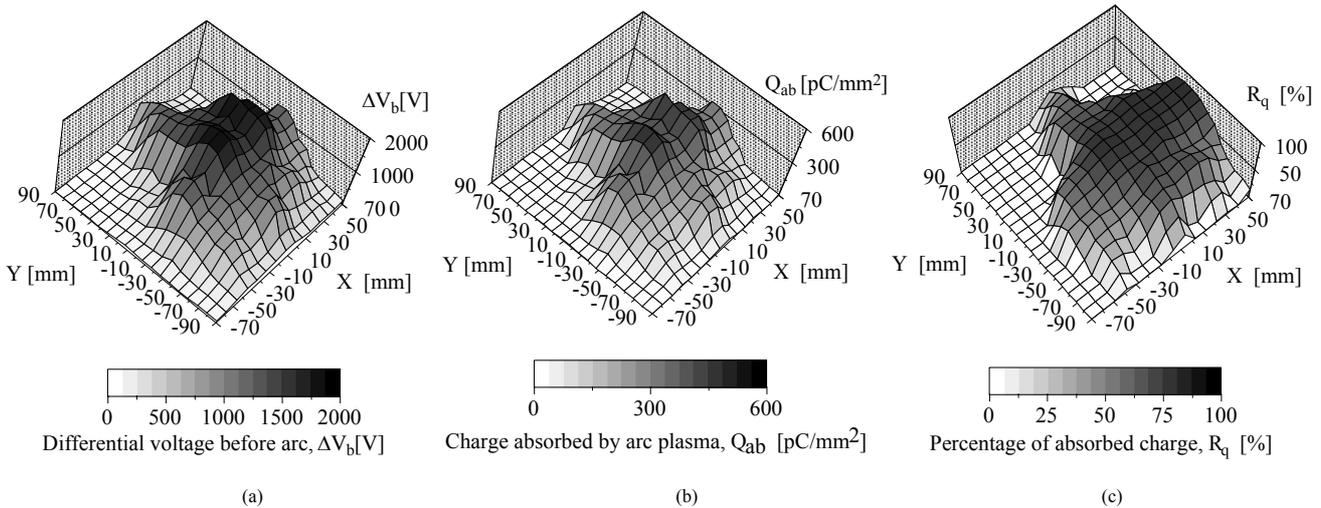


図4 放電前の乖離電圧(a), 放電プラズマの帯電電荷取込み量(b), 帯電電荷取込み率(c)の分布 (電子エネルギーは4keV)
 Fig. 4. Distribution of differential voltage before arc (a), charge absorbed by arc plasma (b), and fraction of charge absorbed by arc plasma (c) for electron energy of 4keV.

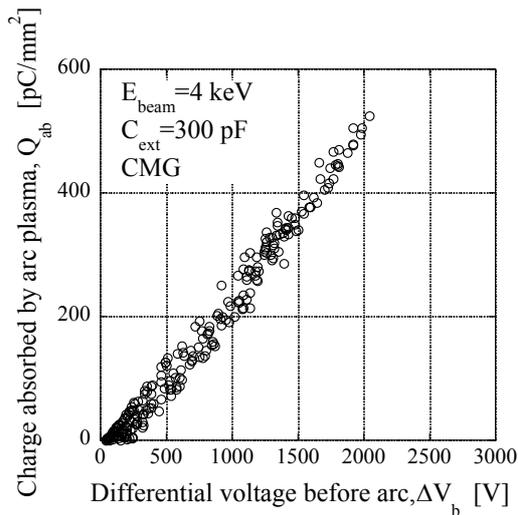


図5 放電プラズマの帯電電荷取込み量と放電前の乖離電圧の関係 (電子エネルギーは4 keV)

Fig. 5. Relationship between charge absorbed by arc plasma and differential voltage before arc for electron energy of 4 keV.

と帯電電荷の取込み量の関係をプロットしたものを図5に示す。285点のデータが直線に沿っており、電荷取込み量は放電前の乖離電圧に比例して増加していることが分かる。図中の試験結果を線形近似すると、放電前の乖離電圧1Vあたり0.25 pC/mm²の帯電電荷を取込んでいる。放電前の帯電電荷量は乖離電圧に1 mm²あたり0.3 pFをかけたものであるため、放電プラズマの帯電電荷取込み率 R_q はおよそ80%であると予想される。図6に帯電電荷取込み率のヒストグラムを示す。これは観測した4回の放電全てのデータをまとめて、計1140点のデータより計算している。図に示

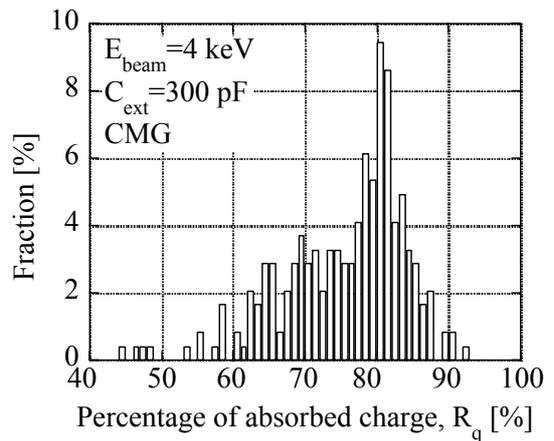


図6 帯電電荷取込み率のヒストグラム

Fig. 6. Histogram of fraction of charge absorbed by arc plasma.

すように、帯電電荷取込み率は60~90%の間に広がりを持つものの、80%付近に強いピークを持っている。

〈3・2〉 放電前の電位分布パターンに対する依存性 図7にCMGクーポンに6 keVの電子を照射した時の放電前の乖離電圧、放電プラズマの帯電電荷取込み量、及び帯電電荷取込み率の分布図を示す。図4に示された4keVの電子照射に比べて乖離電圧が若干低い。これは帯電方法が、2次電子放出によるもの(6 keV)とイオン電流によるもの(4 keV)の違いにあると思われる。放電前の乖離電圧の分布はクーポン中心部と y=-90 mm 付近とに二つのピークをもっている。また、図7(c)に示したように、放電前には高い乖離電圧をもっているのに、電荷があまり取込まれていない領域がある。同じ条件で4回の放電を観測したが、どれも同様のパターンを示しており、データの再現性はよい。図8に1

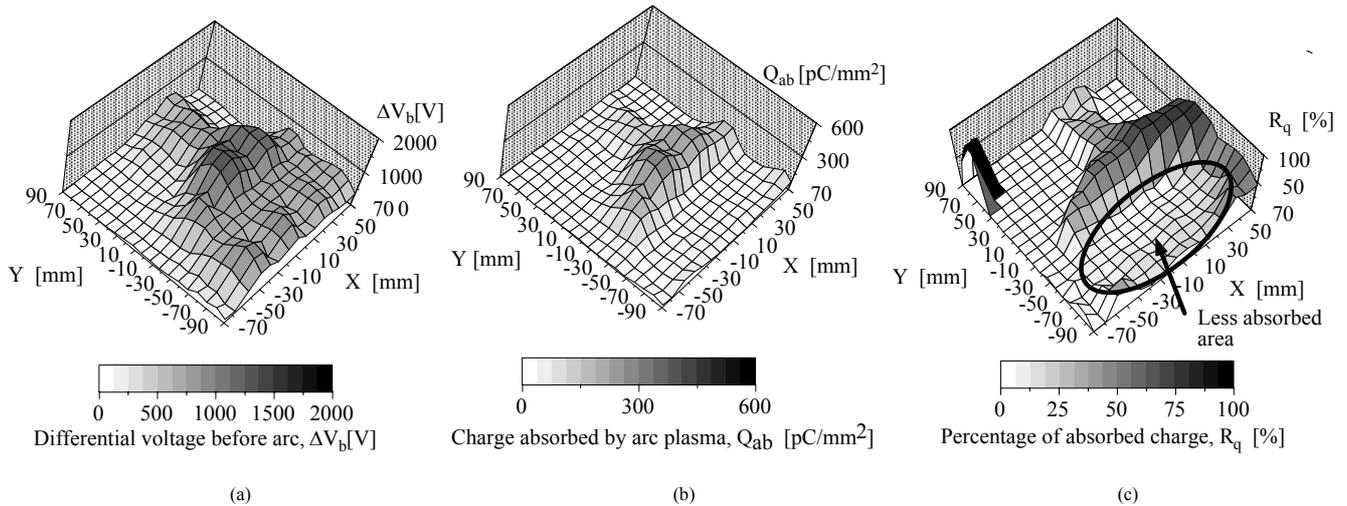


図7 放電前の乖離電圧(a), 放電プラズマの帯電電荷取込み量(b), 帯電電荷取込み率(c)の分布 (電子エネルギーは6keV)
 Fig. 7. Distribution of differential voltage before arc (a), charge absorbed by arc plasma (b), and fraction of charge absorbed by arc plasma (c) for electron energy of 6keV.

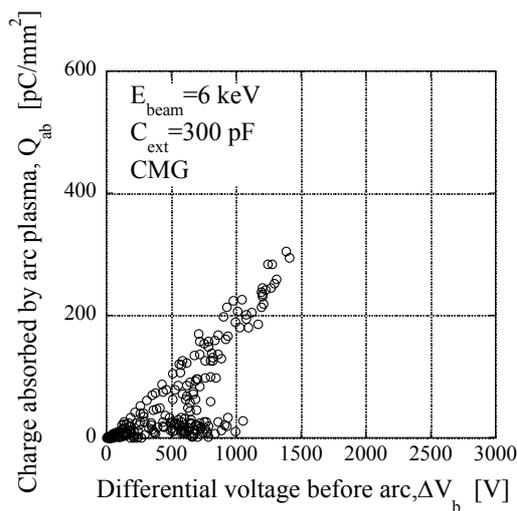


図8 放電プラズマの帯電電荷取込み量と放電前の乖離電圧の関係 (電子エネルギーは6 keV)
 Fig. 8. Relationship between charge absorbed by arc plasma and differential voltage before arc for electron energy of 6 keV.

回の放電で計測した 285 点の放電前の乖離電圧と帯電電荷取込み量の関係を示す。図 5 と違って、直線にのらない部分があることがわかる。この部分は図 7(c)で示した領域のデータに相当する。

図 9 は、トリガークの発生箇所が放電プラズマの帯電電荷取込み現象に影響を及ぼすか調べたものである。CMG で電子エネルギーが 6 keV の場合で、図中の No.1 と No.2 のトリガークが発生した箇所はおおよそ 90mm 離れているが、放電プラズマの帯電電荷取込み率の分布に大きな違いは見られなかった。これより、放電プラズマは、トリガーク発生箇所に近い帯電電荷を多く取込むのではなく、周

辺の帯電電位分布に応じて取込む帯電電荷量が決まるものと思われる。

〈3・3〉 放電初期の放出電荷量に対する依存性 図 10 と図 11 は実験 3 において外部キャパシタンス C_{ext} を変えた時の、電荷取込み量と放電前の乖離電圧の関係である。まず、4 keV の場合であるが、 $C_{ext}=300$ pF の結果である図 5 と比較すると、外部キャパシタンスを変えても、帯電電荷取込み量に変化がなかった。即ち放電初期の放出電荷量は帯電電荷取込み量に影響を与えない。電子エネルギーが 6 keV の場合は外部キャパシタンスを 20 nF まで上げると、電子エネルギー4keV の時のように全測定点のデータが一つの直線上にのってくる。即ち、図 7 で示されるような、放電前の乖離電圧は高いのに電荷が取込まれない領域がなくなっている。又、帯電電荷取込み量が放電前の乖離電圧に比例している部分の帯電電荷取込み量には変化がない。

図 12 に電子エネルギーが 6 keV の場合に、外部キャパシタンスを変えた時の放電電流波形を示す。図に示すように外部キャパシタンスを 300 pF から 20 nF に変えると、放出される電荷量が $1.8 \mu C$ から $120 \mu C$ に増えるだけでなく、放出時間も $4 \mu sec$ から $30 \mu sec$ と長くなる。

〈3・4〉 カバーガラスの材質に対する依存性 実験 4 において放電プラズマの取込む電荷量が、カバーガラスの材質にどう依存しているか調べた結果を示す。図 13 に、電子エネルギーが 3.5 keV の場合の、放電プラズマの帯電電荷取込み量と放電前の乖離電圧の関係を示す。図 13 において、全体的に CMG の方が CMX より帯電電荷取込み量が若干多く見える。そのことを確かめるため、実験 4 における全放電のデータ (CMG で 9 発, CMX で 5 発) を使って、帯電電荷取込み率 R_q を統計的に算出した。CMG の放電で計測した 2565 点の R_q の平均が 77.7 % で標準偏差が 4.4%, CMX の放電で計測した 1425 点の R_q の平均が 63.7 % で標準偏差

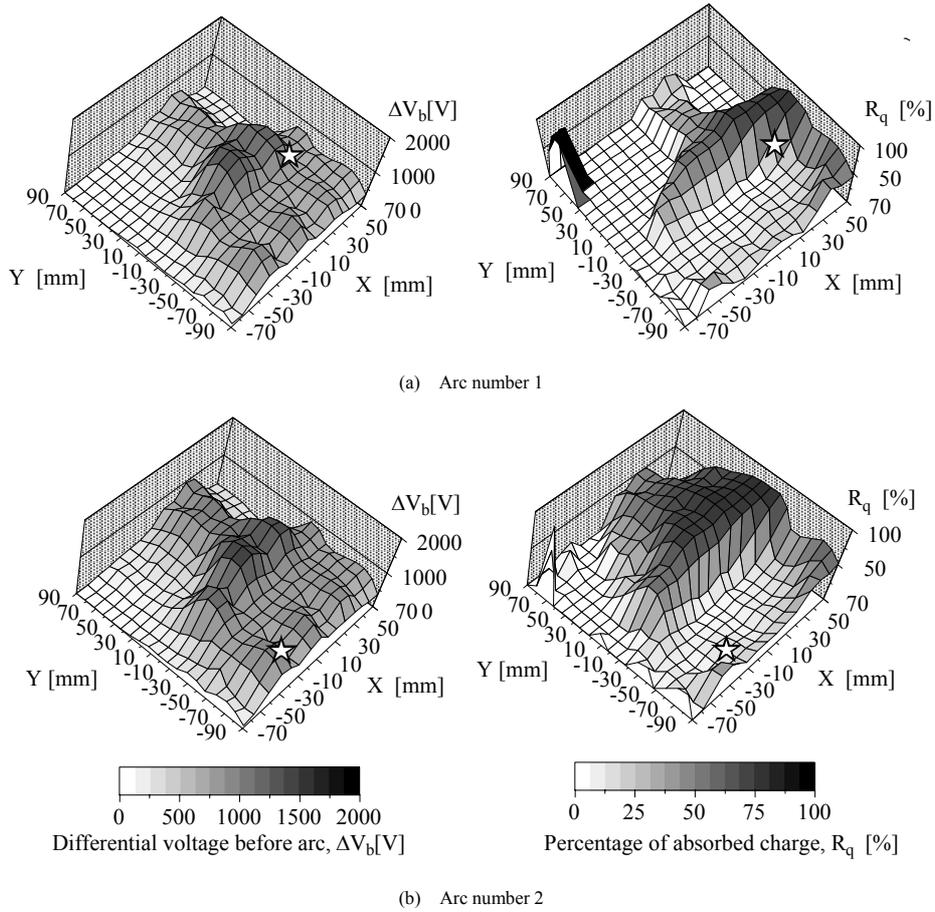


図9 トリガアークの発生箇所（図中の星マーク）が異なる時の帯電電荷取込み率の分布

Fig. 9. Distribution of differential voltage before arc and fraction of charge absorbed by arc plasma for different arc positions (arc positions are marked by stars).

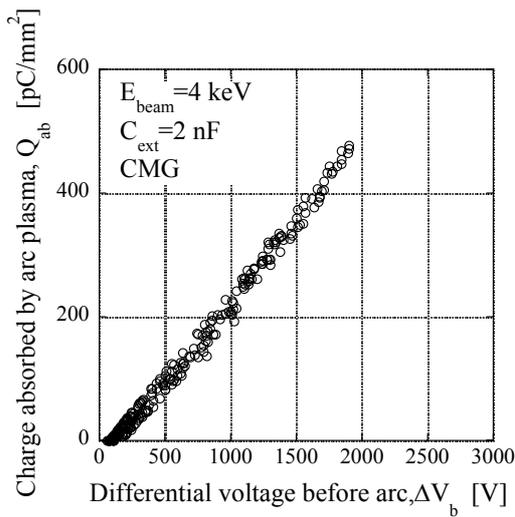


図10 外部キャパシタンスを2nFとした時の放電プラズマの帯電電荷取込み量と放電前の乖離電圧の関係（電子エネルギーは4keV）

Fig. 10. Relationship between charge absorbed by arc plasma and differential voltage before arc with the external capacitance of 2nF for electron energy of 4keV.

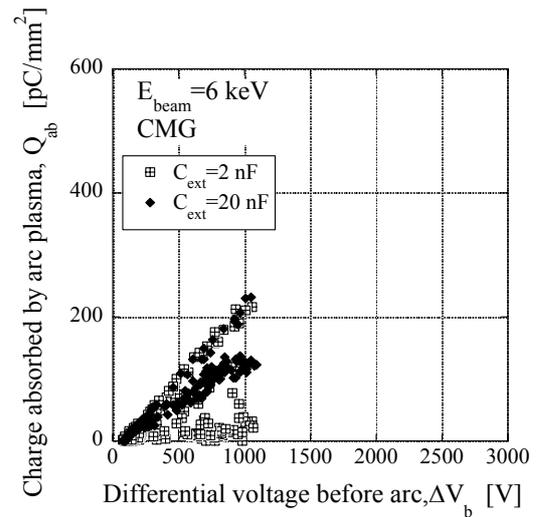


図11 外部キャパシタンスを変えた時の放電プラズマの帯電電荷取込み量と放電前の乖離電圧の関係（電子エネルギーは6keV）

Fig. 11. Relationship between charge absorbed by arc plasma and differential voltage before arc for different external capacitance with electron energy of 6keV.

が 3.6% であった。このことから、CMG の方が CMX よりおよそ 10% 程度、帯電電荷取込み率 R_q が高い。しかし、前述したように表面を含む CMG と CMX の詳細な組成は公表されていないので、具体的にカバーガラスの材質の何に対して依存性があるかは判断出来なかった。

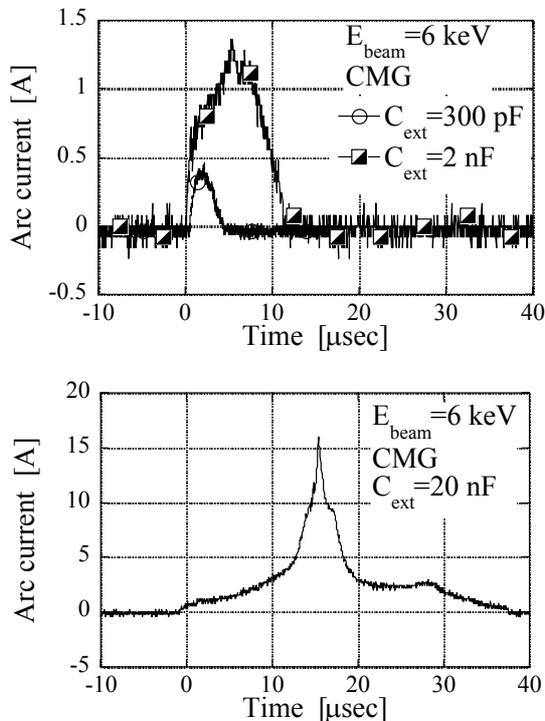


図 12 外部キャパシタンスを変えた時の放電電流波形
Fig. 12. Arc current waveforms for different values of external capacitance.

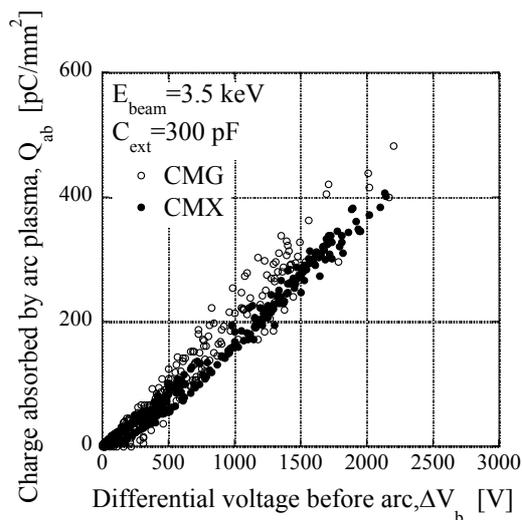


図 13 カバーガラスの材質が異なる時の放電プラズマの帯電電荷取込み量と放電前の乖離電圧の関係
Fig. 13. Relationship between charge absorbed by arc plasma and differential voltage before arc for different coverglass material.

4. 考察

図 5 に見られるように、照射電子エネルギーが 4 keV の時は、放電前の乖離電圧と帯電電荷取込み量は多くの測定点で比例関係にあった。これは、放電プラズマ中の電子は、放電発生点から四方に放出された後、電位の高さにより引き寄せられる量が決まってしまうためであると思われる。しかし、電子エネルギーが 6 keV の時は図 7(c) で示された部分で帯電電荷が取込めなかった。

この理由を考察するために、図 14 のようなモデル図を考える。図に示すように、帯電電位が山型になっている部分が 2 箇所あり、かつ、両者のピーク電位は異なるものとする。又、ピーク電位が低い方が、帯電電荷を取込んでいない領域 (図 7(c) 中の Less absorbed area) とする。このような電位分布の場合にトリガークが発生すると、放出された放電プラズマは四方に均一に拡散するのではなく、電位の高い部分が大部分の放電プラズマを引き寄せる。そのため、ピーク電位の高い部分は帯電電荷を多く取込む。しかし、ピーク電位が低い部分は、あまり放電プラズマを引き寄せないので、帯電電位がある程度高くても帯電電荷を取込めないものと思われる。尚、4 keV の場合は、電位分布パターンが図 4 からわかるように 1 山型であり、帯電している部分の帯電電荷取込み率はほぼ一定であった。この結果から、放電プラズマの電荷取込み現象は、カバーガラス表面の電位分布に依存していると思われる、かつ、電位分布が 1 山型でない場合は、ピーク電位が低い山の部分で帯電電荷取込み率が著しく低下するものと思われる。

電位分布パターンが 2 山型であっても、放電発生時の初期電荷量が増加すると、均等に電荷が取込まれるようになる。トリガーク発生直後は、帯電電位の高い部分が大部分の放電プラズマを引き寄せるため、帯電電荷を取込めない部分が存在する。しかし、外部キャパシタンスが大きくなると、電位が高い部分で電荷を取込んだ後も、図 12 に示されるように比較的長い時間にわたって放電発生箇所から電荷が放出されている。しかも、電位が高い部分は帯電電荷を取込まれたために電位が低くなり、放電直後に比べると、帯電電荷を取込んでいない部分は放電プラズマを多く引き寄せる事になる。このことから、図 8 と 11 の比較に示されるように、外部キャパシタンスが 300 pF の場合には帯電電荷を取込めなかった部分も、20 nF の場合には放電プラ

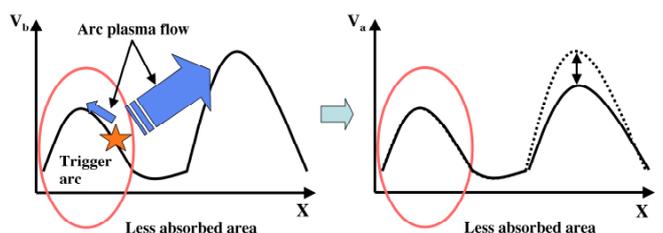


図 14 帯電電荷取込みのモデル図
Fig. 14. Model figure of charge absorption by arc plasma.

ズマをより多く引き寄せる事が出来るので帯電電荷を取込んでいられると思われる。

尚、電位分布が 2 山型の時でも、高いピーク側は放電前の乖離電圧と帯電電荷取込み量が比例している。図 8 や図 11 からわかるように、 $E_{beam}=6$ keV の場合でも、それらの部分は $E_{beam}=4$ keV の時と同様に Q_{ab} と ΔV_b の関係が一つの直線上にのっている、図 6 に示されるように帯電電荷の 80 % が取込まれている。即ち、外部キャパシタンス 300 pF の時の初期放出電荷量 $1.8 \mu\text{C}$ 、放出時間 $4 \mu\text{sec}$ の段階で、すでに放電プラズマが帯電電荷の 80 % を取込んでいるものと思われる、80 % という数字が帯電電荷取込み率の上限となっていると思われる。

ここで問題は、このような電位分布の不均在実際の軌道上で起きるかどう点である。数値シミュレーションでは、全長 10 m 程度の太陽電池パネルの両端で、1 kV 以上の帯電電位の差が出る事が報告されている⁽⁹⁾。シミュレーションの空間分解能が 2 m 程度しかなく、10mm 程度の細かさで帯電電位が不均一になるかどうかは不明である。但し、実機では、太陽電池のある列がアンテナ等の影に入って発電していないのに隣の列が発電していると、隣接列間にアレイ出力電圧 (100 V) 程度の電位差が発生し、10 mm 程度で帯電電位が 100 V 違うことは起こり得る。更にその電位差が 100 V を超えるようなものになるかどうかを知るには、より均一な分布を持つ電子ビームを、より大面積の供試体に照射して確認する必要がある。

5. まとめ

静止軌道上で、トリガアーク発生時に発生する放電プラズマの帯電電荷取込み量について、真空チャンバー内での実験による検討を行った。その結果以下の事が分かった。

(1) 放電プラズマの帯電電荷取込み量は、放電前の乖離電圧に比例して増加する。これは、周辺カバーガラスの電位に引き寄せられる放電プラズマ中の電子の量が、その電位により決まっているためと考えられる。

(2) 帯電電荷取込み量は、今回測定した 200 mm 四方の範囲では放電発生点の位置に対して依存しなかった。

(3) 帯電電荷取込み量は、周辺の電位分布に依存している。電位分布によっては、前述した比例関係に従わずに帯電電荷を取込んでいない部分もあった。これは、放電プラズマが、発生点から均一に拡散するのではなく、電位の高い部分に偏って拡散する事が原因と考えられる。

(4) 放電初期の放出電荷量が多く、かつ、放出時間が長くなると、帯電分布によらず均一に電荷を取込む。これは、電位の高い部分の帯電電荷が取込まれ電位が低くなると、放電プラズマが偏らずに拡散するようになり、取込み量が少ない部分に電子が多く引き寄せられるようになることが原因と考えられる。

(5) 帯電電荷取込み量は、カバーガラスの材質に依存する。今回用いた CMG と CMX では、CMG の方が 10 % 程度電荷取込量が多い。しかし、具体的にカバーガラスの材質

の何に対して依存性があるかは判断できなかった。

本試験により得られた、放電プラズマの帯電電荷取込み量の基礎的な特性は、今後、軌道上でトリガアークが得る放電エネルギーを予測するうえで役立てられると思われる。本試験の測定範囲は、200 mm 四方で実機の太陽電池アレイ面積の 100 分の 1 に満たない。そのため、測定範囲を更に広げて試験を実施し、放電プラズマの帯電電荷取込み量を調べる事が、今後検討すべき課題である。

謝辞

太陽電池アレイコーボンパネルを提供して頂いた NEC 東芝スペースシステム株式会社と、様々な面で研究に協力して頂いた九州工業大学の匹田政幸教授に深く感謝致します。

(平成 15 年 4 月 10 日受付, 平成 15 年 7 月 22 日再受付)

文 献

- (1) 趙 孟佑:「宇宙太陽光発電の高電圧化に向けた課題」, 電学誌, Vol.121, No.6, pp.381-383 (2001-6)
- (2) I. Katz, V.A.Davis, and D.B.Snyder: "Mechanism for Spacecraft Charging Initiated Destruction of Solar Arrays in GEO", AIAA paper, 98-1002,36th Aerospace Sciences Meeting, Reno (Jan,1998)
- (3) 伊藤忠典・丸橋克英 編著: 宇宙環境科学, オーム社 (2000)
- (4) D.E.Hastings and H.B.Garret: Spacecraft Environmental Interactions, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1996)
- (5) 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」, 航空宇宙学誌, Vol.51, No.592, pp.139-145 (2003)
- (6) P.Leung: "Plasma Phenomena Associated with Solar Array Discharge and Their Role in Scaling Coupon Test Results to a Full Panel", AIAA Paper, 2002-0628, 40th Aerospace Sciences Meeting, Reno (2002-1)
- (7) T. Matsumoto, Y. Shikata, K. Toyoda, M. Cho, and Y. Nozaki: "Charging test of High Voltage Solar Array for Geostationary Satellite", 46th Space Sciences and Technology Conference, p.49, Tokyo (2002) (in Japanese) 松本敏明・志方吉夫・豊田和弘・趙 孟佑・野崎幸重:「静止軌道搭載型他高電圧太陽電池アレイの帯電試験」, 第 46 回宇宙科学技術連合講演会, p.49 (2002)
- (8) CDAweb <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>
- (9) H.Fujii: "Charging Analysis of Engineering Test Satellite VIII of Japan", SP-476, 7th Spacecraft Charging Technology Conference, ESA-ESTEC, Noordwijk (2001-4)

松本敏明 (学生員) 1978 年 07 月 17 日生まれ。2003 年 3 月九州工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月三菱電機特機システム(株)に入社。



志方吉夫 (学生員) 1980 年 10 月 23 日生まれ。2003 年 3 月九州工業大学卒業。同年 4 月同大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程入学。



豊田 和弘



(非会員) 1972年12月21日生まれ。2001年3月東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。同年4月九州工業大学SVBL非常勤研究員。2003年4月より千葉大学工学部都市環境システム学科助手。

趙 趙 佑



(正員) 1962年12月19日生まれ。1991年12月マサチューセッツ工科大学大学院博士課程修了。1992年神戸大学大学院自然科学研究所助手。1995年7月国際宇宙大学(フランス)助手を経て1996年8月九州工業大学工学部講師, 1997年10月同助教授。高電圧宇宙機と宇宙プラズマの相互作用に関する研究, レーザ生成プラズマの工学的応用, 電磁界シミュレーションに関する研究に従事。Ph.D. 日本航空宇宙学会, アメリカ航空宇宙学会会員。