

宇宙プラズマと高電圧太陽電池アレイの干渉に関する研究

岩 佐 稔^{*1}, 田 中 孝 治^{*2}, 佐々木 進^{*2}, 小田原 修^{*1}

Study of The Interaction between Space Plasma and High Voltage Solar Array

by

Minoru Iwasa^{*1}, Koji Tanaka^{*2}, Susumu Sasaki^{*2}, and Osamu Odawara^{*1}

Abstract: We are studying the problems associated with high voltage power systems in space. Especially we are interested in the potential distribution of the solar array that is resistant to the electrical discharge. We have carried out experiment on the interaction between the space plasma and the high voltage solar array. An array of electrodes distributed on a dielectric material was used to simulate the inter-connectors of the solar array panel in space environment. One of major concerns in the usage of the high voltage solar array in space is the arc discharge on the array. Based on the plasma sheath theories, there is a possibility to control or to prevent the discharge by selecting a potential distribution of the electrode array. As the first step to find the potential distribution that is tolerate to the discharge, we measured the current to the electrodes, changing the spacing of the electrodes. This paper presents the experimental results suggesting that we can control the discharge by selecting a proper potential distribution of the high voltage solar array.

Key words: plasma interactions, spacecraft charging, high voltage solar array

1. はじめに

宇宙開発の初期の宇宙機は電力1 kW以下でその使用電圧は28 V程度であったが、最近の数kW級の大型衛星では50～100 Vの電圧が使用され、100 kW級の国際宇宙ステーションでは100 V以上の電圧が使用されるに至っている。今後、人類の新しいエネルギーシステムとして期待されている太陽発電衛星ではGW級の発電が考えられている。これら大電力を使用する宇宙機ではジュール損失の低減やケーブル軽量化のために低電流、高電圧化は必須となっており[1]、GW級の電力を扱う太陽発電衛星ではkV以上の発電電圧が想定されている[2]。一般に太陽電池のインターコネクタ部は宇宙空間に暴露しており、高電圧と周辺プラズマとの干渉によって、放電、電流リーク、表面損傷、回路破壊などの問題が発生する可能性がある[3][4]。これらの対策としては絶縁体で太陽電池パネルをシールドして放電を防ぐという方法があるが、宇宙空間では高速の宇宙浮遊物との衝突は不可避であり絶縁シールドは必ずしも根本的な解決策とはならない。そこで、我々は太陽電池アレイの電位分布を適切に選ぶことによりインターコネクタ部における放電を抑圧する可能性について研究を行っている。プラズマプローブ理論[5]によれば、インターコネクタで捕集されるプラズマ電流は太陽電池アレイ周辺のシース構造に依存する。また、シース構造は太陽電池アレイの電位分布に依存することから、アレイの電位分布をコントロールすることで、放電を抑えることができると考えられる。そこで、第一段階として、インターコネクタを模擬した電極アレイからの

*1 Tokyo Institute of Technology

*2 JAXA/ISAS

プラズマ電流を詳細に評価し、アレイ化における特性を検証したので報告する。

2. 実験方法

図1に本実験の装置構成を示す。磁場拡散型プラズマ源を搭載した直径1 m、長さ1.8 mの真空チェンバー内に絶縁体上に直径1 mmの銅電極を3×3個配列した模擬太陽電池アレイ（図2）を設置した。アレイに0～400 Vの電圧をバイアスした時のアレイからのプラズマ電流を計測した。実験の手順としては、まず1つずつの電極に独立に電圧をバイアスし、各電極のプラズマ電流をそれぞれ計測した。次に9個すべての電極に同時に電圧をバイアスし、各電極のプラズマ電流を計測した。電極アレイは電極間の長さを0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 10 cmと変えたものを用意し、それぞれのアレイについて同様の実験を行った。

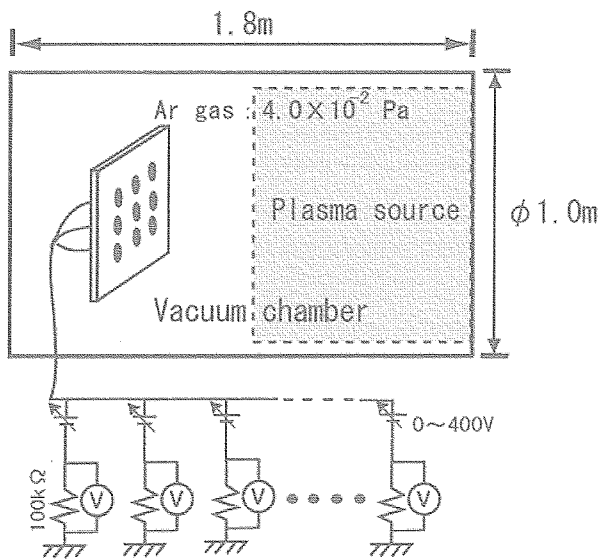


図1 装置構成。

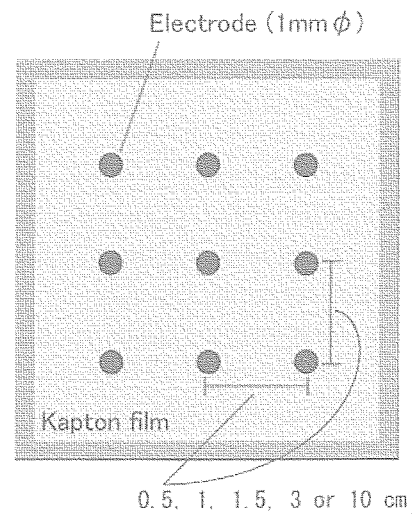


図2 模擬太陽電池アレイパネル。

3. 実験結果と考察

電極間隔3 cmのアレイパネルにおける実験結果を図3に示す。プロット値は9個の電極の平均値を示している。すべての電極に同時に電圧をバイアスした時（3×3 array）の電極電流は1つずつ独立にバイアスした時（single）の電極電流より低くなっており、アレイ化によって、捕集される電流が抑えられていることが分かる。しかしながら、図4（a）に示すように、電極間隔を小さくすると全く異なる特性を示す。これは、電極間隔を0.5 cmにしたもので、低電圧領域では、3 cmパネルと同様にアレイ化によって電流が抑制されているが、バイアス電圧200 V以上で、急激な電流上昇が起こる。図4（b）はパネル近傍に設置したラングミュアプローブによるイオン電流を示したもので、横軸は電極アレイへのバイアス電圧、縦軸はアレイパネルに電圧をバイアスしていない時の値で規格化したイオン電流値である。アレイパネルでの急激な電流上昇が起こる200 V付近で、イオン電流も上昇しているのが分かる。これは、アレイパネル近傍で、電離が発生していることを示している。

図5にその他の電極間隔での実験結果をまとめて示す。縦軸はすべての電極に同時に電圧をバイアスした時の電極電流を示している。電極間隔0.5, 1.0, 1.5 cmで、急激な電流上昇が見られ、間隔が大きくなるほど、発生電圧が高くなっている。電極間隔3.0, 10 cmでは、急激な電流上昇は起こらなかった。

図6にアレイ化による電極電流の減少率を示す。縦軸は1つずつ独立に電圧をバイアスした時の電極電流に対する、すべて同時に電圧をバイアスした時の電極電流の比率を示しており、電極間隔による比較を行った。アレイ化による電極電流の減少は電極間隔が近いほど、その開始がより低電圧側で起きていることが分かる。つまり、アレイ化によって電流捕集に干渉が起きており、電極間隔が近いほどその影響を受けやすいということを示している。これらアレイ化による効果をまとめ

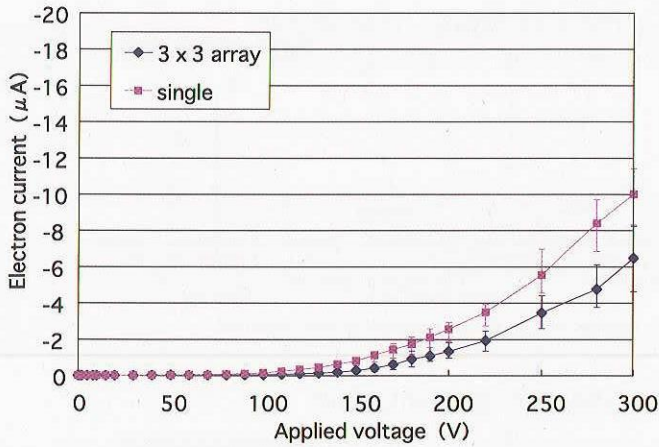


図3 電極間隔 3 cm のアレイパネルにおける V-I 特性.

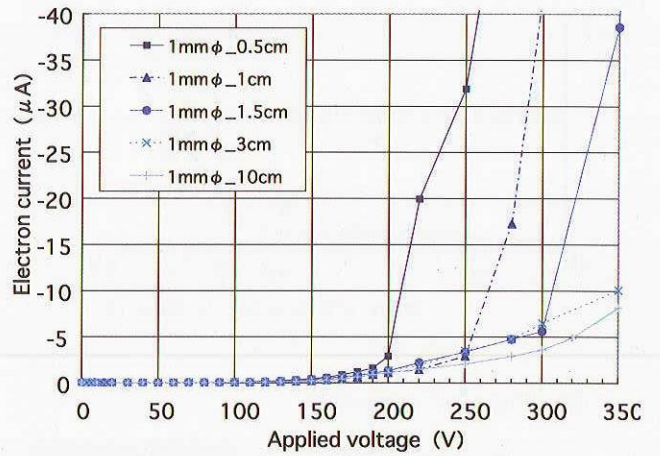
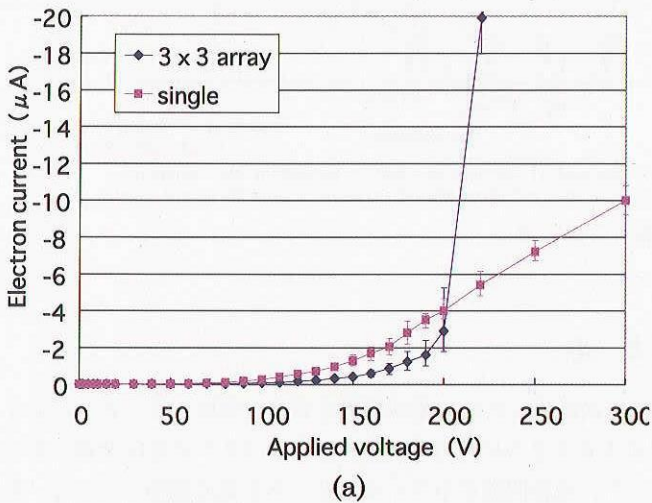


図5 電極アレイの V-I 特性の電極間隔における比較.



(a)

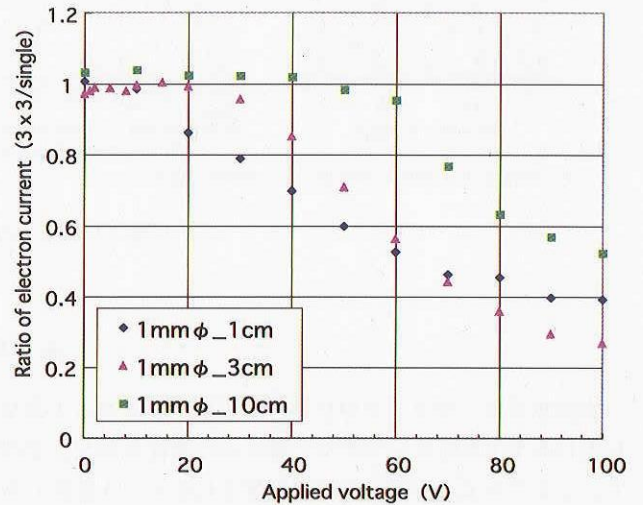
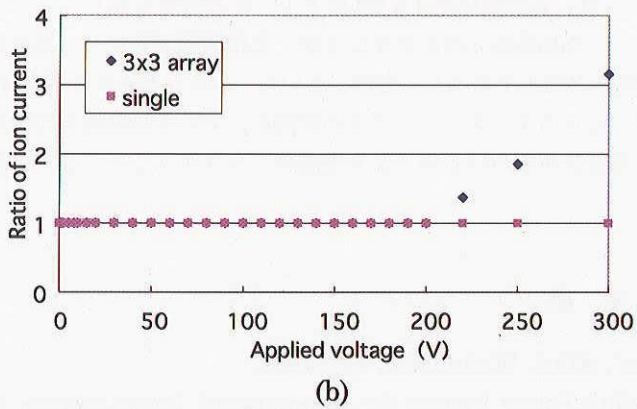


図6 アレイ化による電極電流の減少率.



(b)

図4 (a) 電極間隔 0.5 cm のアレイパネルにおける V-I 特性.
(b) パネル近傍におけるイオン電流比率.

レイパネルからのガス放出が原因ではないかと考えられる。電極間隔が近づくことで、アレイパネルによる電流捕集が一部分に集中されることによって、温度が上昇し、電極周辺の絶縁物からガスが放出されると考えられる (③)。これらのモデルは高電圧太陽電池をデザインする上で、太陽電池セルのインターコネクタの間隔や、太陽電池アレイの発電電圧分布の決定に寄与することができると考えている。

たものを図7に示す。電極アレイにおける V-I 特性には3つのフェーズがあると考えられる。1つめは「電流抑圧フェーズ」で、それぞれの電極に生成されるシースの干渉によって、電極電流は抑えられる (①)。2つめは「スナップオーバーフェーズ」で、電極周辺の絶縁物による2次電子放出により電極電流が増加する [6]。これはアレイに限らず、シングルにおいても見られる現象である (②)。3つめは「電流急増フェーズ」で、本実験では電極間隔が 1.5 cm 以下に見られた現象である。電極間隔によるバイアス電圧の閾値を超えると急激な電流上昇が起こる。これはパネル近傍で電離が発生したため、この電離はア

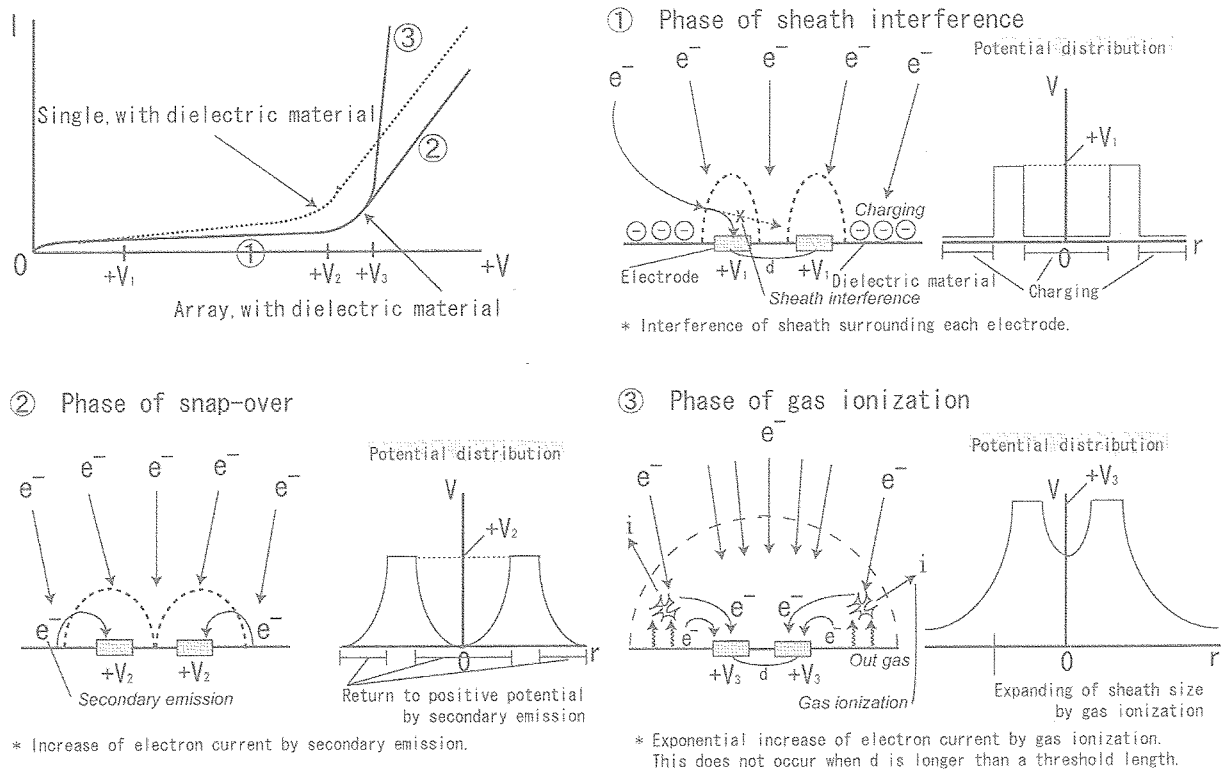


図7 アレイ化効果のメカニズム。

4. ま と め

本実験では、プラズマ中における電極アレイパネルのV-I特性を検証するために電極間隔を変えた実験を行った。アレイにおけるV-I特性はシングルと異なった特性を示し、その特性は大きく2つに分けられる。1つはバイアス電圧全域にわたり、シングルよりも電極電流が抑制されるという特性である。一方、電極間隔が小さくなると、ある電圧閾値によって、抑制されていた電流が急増する。本実験のコンフィグレーションでは、電極間隔が1.5 cm以下で、その特性が見られた。これらは、それぞれの電極におけるシースが干渉することによって、電極電流の抑制が生じるが、電極間隔が狭まり、電流捕集面積が一部に集中することにより、電極アレイパネル近傍で電離が発生することに起因している。これらのメカニズムは、放電が起こりにくい高電圧太陽電池アレイをデザインする上で、セルのインターコネクタの間隔や、アレイの発電電圧分布の決定に寄与することができると考えている。今後、アレイに電位分布をつける等、より実際のコンフィグレーションに沿った実験を計画している。

参 考 文 献

- [1] Griffin, M.D., and French, J.R., "Space Vehicle Design", AIAA, Washington, DC, 1992.
- [2] Nagatomo, M., and Itoh, K., "An Evolutionary Satellite Power System for International Demonstration in Developing Nations", Space Power, Vol.12, pp. 23-36, 1993.
- [3] Stevens, N. J., "High Voltage System—Plasma Interaction Summary", Space Technology Plasma Issues in 2001, pp. 167-193, 1986.
- [4] N. T. Grier, "Plasma interaction experiment II: laboratory and flight results", Spacecraft Environmental Interaction Technology - NASA CP-2336, pp. 333-347, 1983.
- [5] Francis F. Chen, "Introduction to Plasma Physics", Plenum Press, 1974.
- [6] Christian Carpenter, "Comparison of On-orbit and Ground Based Hollow Cathode Operation", NASA/CR-2003-212585, 2003.