

Influence of Potential Distribution on Plasma Interaction with High Voltage Solar Array*

Minoru Iwasa¹, Koji Tanaka², Susumu Sasaki², and Osamu Odawara³

¹IAT/JAXA, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, 305-8505, JAPAN

²ISAS/JAXA, 3-1-1, Yoshinodai, Sagamihara, 229-8510, JAPAN

³Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama,
226-8503, JAPAN

Abstract

The objective of this paper is to clarify the physical process dominating the interaction between the high-voltage solar array and ambient space plasma, and to get implications to minimize the risk of electrical discharge. Current-voltage characteristics of array electrodes in laboratory plasma have been studied in association with the plasma interaction with high-voltage solar array. An electrode or an array of electrodes distributed on a dielectric material was used to simulate the inter-connectors of the solar array panel in space plasma environment. It has been found that the charging effect and secondary electrons of the dielectric material play an important role in collection of the electrode current. In the array configuration, the current of each electrode was generally suppressed as compared with that of single electrode, but a rapid enhancement of the electrode current was observed when spacing of the electrodes was less than a critical value. The profiles of potential distribution to suppress the current collection and the electrical discharge have been identified. These results indicate that we can suppress the high-voltage plasma interaction and minimize the risk of discharge if we select proper dielectric material for the panel, proper spacing of the inter-connectors and proper distribution of the solar array voltage.

*Presented at the 10th SPS Symposium, 2-3 August, 2007

高電圧太陽電池アレイのプラズマ干渉における電位分布の影響*

岩佐稔、田中孝治、佐々木進（JAXA）、小田原修（東工大）

305-8505 つくば市千現 2-1-1

1. はじめに

宇宙開発の初期の宇宙機は電力 1kW以下で、その使用電圧は 28V程度であったが、最近の数kW級の大型衛星では 50~100Vの電圧が使用され、2006年に打ち上げられたETS-VIIIが 100V、100kW級の国際宇宙ステーションでは 160Vの電圧が使用されるに至っている。さらにGW級の発電が考えられている太陽発電衛星では、kV以上の発電電圧が想定されている⁽¹⁾。

宇宙機における太陽電池セルとインターコネクタは接地電位にセル直列中の位置に応じた電圧を足した電位を持つ。太陽電池セルはカバーガラスによって覆われているが、インターコネクタ部は通常の設計では軌道上の熱サイクルによる膨張、収縮に対応するため、そのまま宇宙空間に暴露されており、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、回路破壊などの発生が問題となっている。これまでの衛星で実際にプラズマとの干渉による不具合の報告がいくつかなされており⁽²⁾、宇宙環境は運用軌道、昼夜や太陽活動等の条件に強く依存するため不具合の原因は単純ではないが、宇宙機のプラズマ干渉のメカニズムを明らかにし、その対策を講じることは急務とされている。

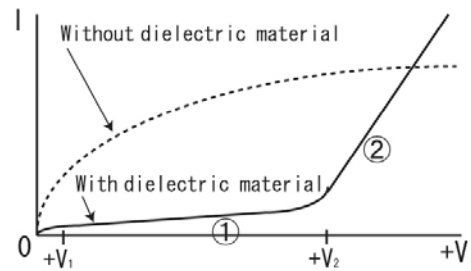
一般に宇宙機の場合、使用電圧 100V以上を高電圧と区分し、プラズマとの干渉に留意した設計が要求される。衛星の電位は周辺プラズマから太陽電池アレイに捕集される電子電流と衛星構体に捕集されるイオン電流のバランスによって決まる。太陽電池アレイの露出導電面積が衛星構体の導電面積よりそれほど小さくない時は電子の移動度がイオンよりも圧倒的に大きいことから、衛星の電位は太陽電池アレイの発電電圧に相当する負電位になる。発電電圧が高電圧になるとインターコネクタ、カバーガラス、周辺プラズマからなるトリプルジャンクションにおいてアーク放電が誘発される⁽³⁾。このモデルに基づいてアレイのデザインガイドラインが提案されている。一方、スペースステーションのように太陽電池アレイの露出導電面積が衛星構体の導電面積よりずっと小さい場合には、太陽電池アレイの大部分は周辺のプラズマに対し正電位となる⁽⁴⁾。この場合はスナップオーバーによる電流増加とグロー放電が誘起される。

そこで本研究では、太陽電池アレイ上の電位分布を適切に選ぶことでプラズマ干渉を抑制し、放電を発生し難くする可能性について調べた。従来、太陽電池の放電抑制にはセルやインターコネクタそのものに対する対策が研究されてきたが、これらの集合体であるアレイとしての放電抑制の研究は新しいアプローチである。本研究では、絶縁体上に電極をアレイ状に配置し、正電位を印加したアレイパネルからの電子電流捕集について実験を行った。電子電流の捕集量は周辺プラズマとの干渉の程度を示す。本研究の目的は電流捕集を支配する過程を明らかにし、電位分布の適切な配置による高電圧太陽電池アレイのプラズマ干渉抑制のための知見を得ることである。

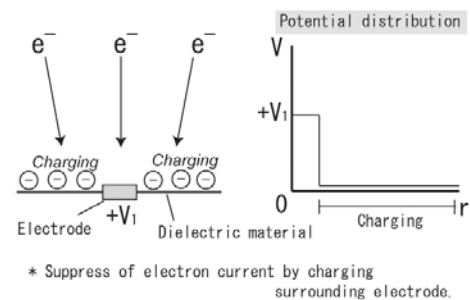
* 10thSPS シンポジウム、2007年8月2-3日

2. 単電極における電子電流捕集のモデル化

アレイのプラズマ干渉を研究する前に単電極の基礎特性と電極周辺の物質が電極の電流電圧特性に与える影響を調べるため、単電極における電子電流捕集のモデル化を行った。その結果を図 1 に示す。図の最上部にあるグラフは単電極の I-V 特性を模式的に表したもので、点線は電極周辺に何も無い場合、実線は周辺物質がある場合をそれぞれ示している。このプロセスには 2 つのフェーズがあると考えられ、+V1、+V2 はそれぞれのフェーズの開始電圧を示す。第 1 フェーズは電流抑制フェーズで、①に示すように電極周辺物質の帯電によって電極周辺に何も無い時に比べ、シース面積が減少することで電流捕集が抑制される。第 2 フェーズは電流急増フェーズで、②に示すように“snap-over”による効果、すなわち周辺物質からの 2 次電子放出により、電極面積が等価的に増加することによって電流捕集が促進される。これらのプロセスから、高電圧太陽電池アレイのプラズマ干渉を抑制するためには、その発電電圧領域で 2 次電子放出率が小さい絶縁材料を露出電極周辺に使用することが必要であると言える。



① Phase of current suppression



② Phase of current enhancement

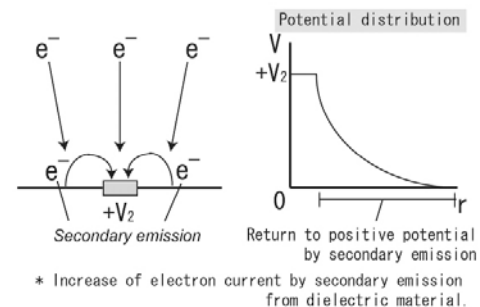


図 1. 単電極における電子電流捕集モデル

3. 3×3アレイ電極における電子電流捕集のモデル化

次にアレイ化によるプラズマ干渉の影響について調べるため、3×3アレイにおける電子電流捕集のモデル化を行った。その結果を図 2 に示す。最上部のグラフはアレイ電極の I-V 特性を模式的に表している。点線は周辺に絶縁物質のある単電極の特性、実線は周辺に絶縁物質のあるアレイ電極の特性を示す。このプロセスには 3 つのフェーズがあると考えられ、+V1、+V2、+V3 はそれぞれのフェーズの開始電圧を示す。①に示すように第 1 フェーズはシース干渉フェーズで、それぞれの電極上に生成される電子シースの干渉によって電流捕集が抑制される。②に示すように第 2 フェーズは“snap-over”フェーズ、③に示すように第 3 フェーズはガス電離フェーズで、電極間隔がある閾値よりも小さい時に起きる。電極間隔が小さくなるとシースがオーバーラップして電子衝突が集中する部分が形成され、電極周辺の温度が上がることでアウトガスが生じ、シース内のガス密度が高くなるため電離が発生して捕集電流の急増をもたらす。よって、電子衝突の集中による電離を避けるためにはインターコネクタの間隔をある閾値以上に保つ必要がある。

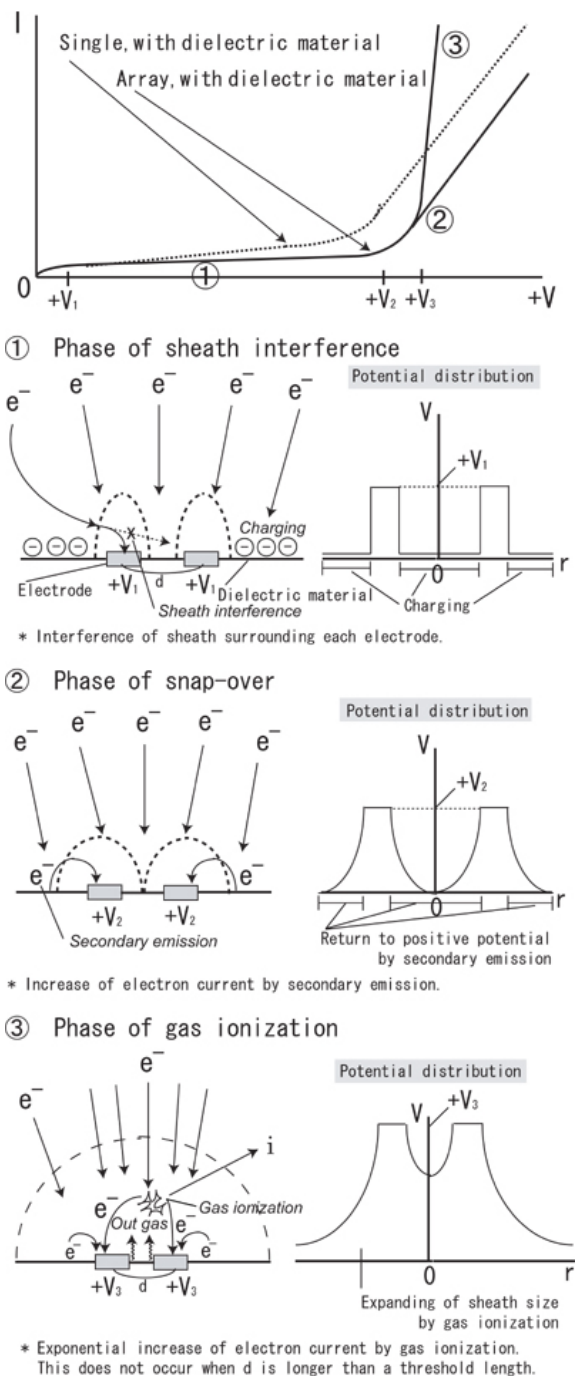


図 2. アレイ電極における電子電流捕集モデル

における電位分布ごとの電離による電極電流の急増、放電の電圧閾値をまとめた。電離はM-typeが一番低電圧で起きており、V-typeが一番高電圧となっている。これは前項の3×3アレイの結果を反映した結果となっている。つまり、M-typeでは電位の高い部分が中央に集中しているため、シースがオーバーラップしてスナップオーバーの重なりが発生し、パネルの温度上昇を加速しており、アウトガスを誘発して電離が起きやすくなっている。V-typeでは、電位の高い部分が両端に

4. プラズマ干渉における電位分布の影響

次にパネル上に形成される電位分布がプラズマ干渉に与える影響を調べるため、10×10アレイによる実験を行った。図3に本実験の装置構成を示す。本実験には直径2.5m、長さ5mの大型スペースチェンバーを使用した。このチェンバーにはロータリーポンプ、ターボポンプ、クライオポンプが接続されており、到達真空度は 10^{-5} Paである。また、プラズマ源には後方拡散型プラズマ源が設備されており、電子密度 $10^{14} \sim 10^{16}/\text{cm}^3$ のプラズマを生成可能である。プラズマ源に対向してサンプルパネルを設置し、パネルに向かって左端にラングミュアプローブ(6mmφ円板プローブ)をセットして実験時のプラズマパラメータを計測した。また、このチェンバーには3次元可動プラットフォームが装備されており、ここに空間電位分布計測用のエミッシブプローブ(フィラメント定格6V115mA)とプラズマモニタ用のラングミュアプローブ(20mmφ球プローブ)を設置した。サンプルパネルは絶縁体(カプトンフィルム)上に直径1mmの電極を10×10個アレイ状に配置したもので、電極間隔が0.5cmと3cmのものを用意した。100個の電極をマルチプレクサーを搭載した三菱電機製の高電圧電源に接続して、最大700Vまで正電圧を印加した時の各電極から流入するプラズマ電流を計測した。本実験では図4に示すように4通りのプロファイルの電圧印加を行い、それぞれのパネルの各電極においてI-V特性を測定した。また、パネル前の空間電位分布をエミッシブプローブにより計測した。本実験の実験条件は電子密度 $1 \sim 1.5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 、電子温度0.2eVであった。表1に電極間隔0.5cmと3cmに

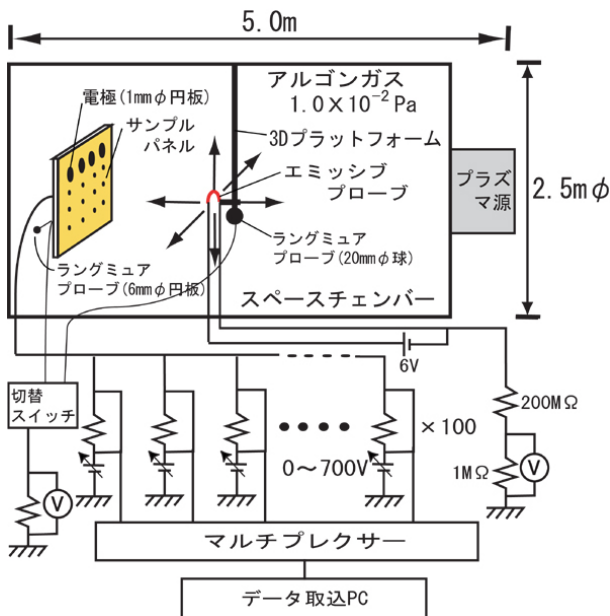


図 3. 10×10 アレイ実験の装置構成

分散されているため、シースがオーバーラップし難く、スナップオーバーの重なりが発生せず、電離が起き難くなっている。同様に電極間隔による比較においても 3cmでは電離の開始電圧が 3 倍近くになっている。一方、放電に関してはパネルへの最大電圧の印加面積が圧倒的に多いF-typeを除けば、V-typeが放電に一番至りやすく、M-typeが放電に一番至り難くなっている。これは電離後のシースの広がりやすさに起因している。シースが広がると等価的な電極面積が拡大し、多くの電流を捕集する。これには正のフィードバックがかかるため、なだれ式に電極電流が増加し放電に至りやすくなる。電位の高い部分が中央にある場合、その周辺にシースが広がり難いが、端にある場合は広がりやすい。図 5~8 に示す電位分布の計測結果を比較すると一目瞭然で、

M-typeはシースの広がりが小さく、V-typeは両端に大きく広がっている。同様に 2 番目に放電に至りやすい 10P-typeでは、片側の端に大きく広がっている。つまり、放電を抑制するためには電位の高い部分を中央に配置し、シースを広がり難くすることが必要である。

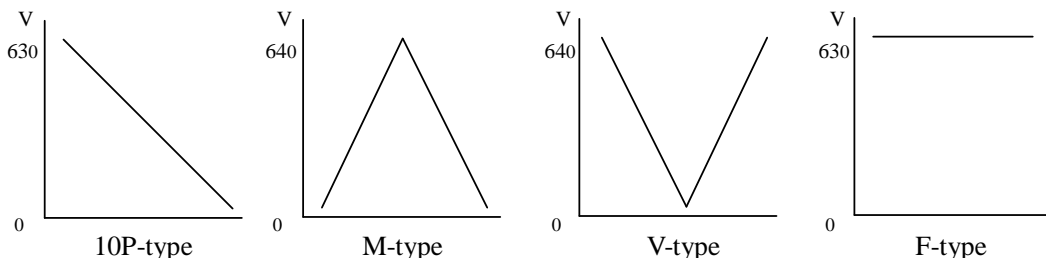


図 4. 4 種類の印加電圧分布

表 1. 電離と放電の電圧閾値

電位分布	電極間隔0.5cm		電極間隔3cm	
	電離	放電	電離	放電
10P-type	180V	450V	540V	なし
M-type	160V	560V	400V	なし
V-type	240V	400V	なし	なし
F-type	200V	300V	500V	なし

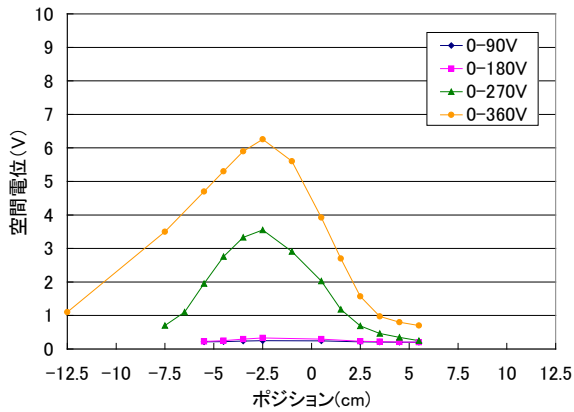


図 5. パネルから 2cm 前方の面に平行な空間電位分布 (電極間隔 0.5cm、10P-type)

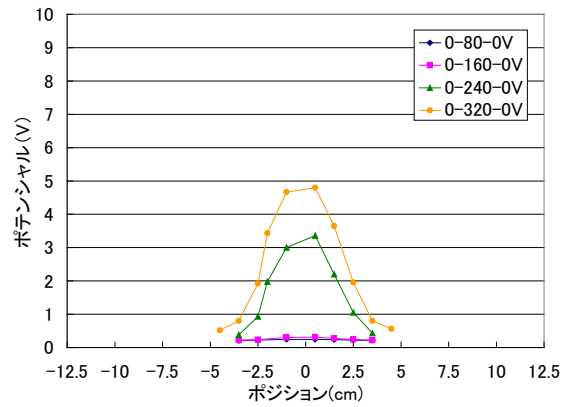


図 6. パネルから 2cm 前方の面に平行な空間電位分布 (電極間隔 0.5cm、M-type)

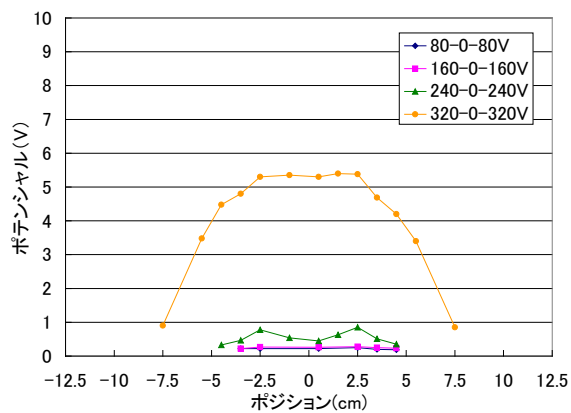


図 7. パネルから 2cm 前方の面に平行な空間電位分布 (電極間隔 0.5cm、V-type)

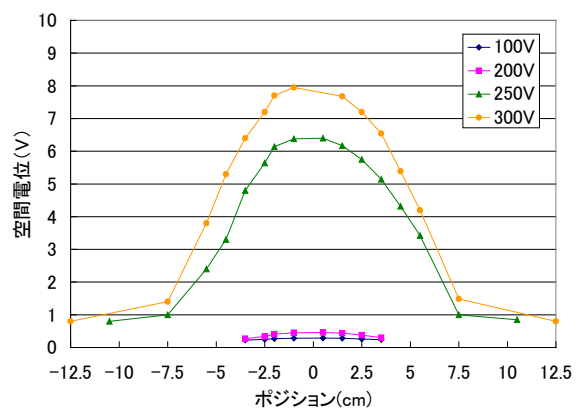


図 8. パネルから 2cm 前方の面に平行な空間電位分布 (電極間隔 0.5cm、F-type)

5. まとめ

本研究では、宇宙用高電圧太陽電池のプラズマ干渉のメカニズムを明らかにし、電位分布の適切な配置によるプラズマ干渉抑制のための知見を得ることを目的として 3 種類の実験を行い、以下の結論を得た。

- インターコネクタ周辺の材料に関して、運用電圧範囲において 2 次電子放出率が 1 を超えない、あるいは 1 を超える場合でもできるだけ小さな材料を選択する。
- インターコネクタの配置に関して、スナップオーバーを引き起こす部分の重なりが発生しないようインターコネクタの間隔を保つ。
- アレイの電位分布に関して、シースの広がり を抑制して放電を発生し難くするために電位の高い部分を中央に配置する。

参考文献

- (1) Nagatomo, M., and Itoh, K., Space Power, Vol.12 (1993) 23.
- (2) Katz, I., Davis, V. A. and Snyder, D. B.: AIAA PAPER 98-1002, (1998).
- (3) Cho, M., Miyata, N. and Hikita, M., J. Spacecraft Rockets, 37 (2000) 150.
- (4) Christian Carpenter: NASA/CR-2003-212585 (2003).