

Preliminary experiment of discharge phenomena on antenna surface radiating high power microwave in Plasma environment

Hyoungwan Woo, Arifur R.Khan, Hirokazu Masui, Mengu Cho

Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui, Tobata-ku, Kitakyushu, 804-8550, JAPAN

Takehiro Miyakawa, Tatsuhito Fujita

JAXA/ARD

Abstract :

Space Solar Power System (SSPS) transfers enormous amount of electrical energy through microwave. Flight demonstration onboard a small satellite in Low Earth Orbit is now under consideration. When a high power microwave is irradiated from antenna in LEO plasma environment, there is a concern about multi-pactoring discharge caused by interaction between the plasma and the microwave. There has been no experimental observation on such interaction phenomenon. Verification experiment is essential for Space Solar Power System to become a reality.

We have set-up an experimental system that can simulate the radiation of high power microwave in dense plasma in a vacuum chamber. A RF plasma source is installed to the chamber and can produce the Argon plasma environment of 10^{13}m^{-3} with 1eV temperature under a back pressure of 10^{-5}Pa . A circular, rectangular and array patch antenna (Teflon as substrate), a circular patch antenna (Glass epoxy as substrate) have been installed inside the vacuum chamber, separately. The antenna is connected to a magnetron that can produce 5.8GHz microwave up to 400W power. We examined interaction between patch antennas surface and microwave in a vacuum chamber. We observed discharge on the patch antenna depending on the microwave strength and plasma environment.

宇宙環境下で高強度マイクロ波放射を行うアンテナ表面の放電現象の予備実験

禹炯官、Arifur R.Khan、増井博一、趙孟佑(九工大)、宮川雄大、藤田辰人(ARD/JAXA)

1. はじめに

近年、深刻なエネルギー需要増加の問題を解決する対策の一つとして宇宙太陽エネルギー利用システム (SSPS) [1][2] に脚光が当てられている。SSPS の実用化の前には様々な実証段階を経なければならないが、小型衛星を用いた低軌道から地上までのマイクロ波伝送実験が本格的に検討されている。低軌道での実験では、送電用パッチアンテナよりマイクロ波が放射された際に、周辺の高密度プラズマと相互作用を起こしてアンテナ表面で放電を引き起こす可能性がある。本研究の目的は低軌道相当のプラズマ環境下でアンテナから高強度マイクロ波を放射した時、アンテナの表面で放電が発生するかを実験的に調べ、発生するのであればその原因を突き止めることである。想定される放電モードとしては RF ガス放電とマルチパクタ放電 [3] がある。マルチパクタ放電とは図 1 に示すように電極 A から出発した電子が高周波電場で加速され、対向する電極 B へ到達し、2 次電子を放出させる。このとき、高周波電場の位相も逆転するため、放出された 2 次電子による電子加速走行と高周波電場が同期し、電子数が急増して脱ガス・放電に至るというものである。

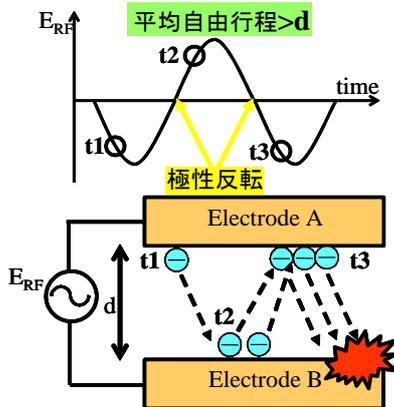


図 1. マルチパクタ放電発生メカニズム

2. システム構成

実験システムは図 2 に示したようにマイクロ波の発生装置、宇宙プラズマ環境を模擬するために真空チャンバーとプラズマ源、電力をマイクロ波に変換して伝送するマイクロ波の放射用アンテナと放電現象を測定する装置で構成されている。まず真空チャンバーとプラズマ源を用いて低軌道宇宙環境と類似する環境を作るために高密度プラズマ環境を造成する。真空チャンバーが高密度プラズマ環境になればマイクロ波発振器からマイクロ波を発生させる。マイクロ波が導波管を通して伝送線変換アダプターにより同軸ケーブルを通して伝送されて、真空チャンバー内にあるパッチアンテナから放射される。マイクロ波の電力を増加させていって、パッチアンテナの表面で放電が発生するかどうかを観察する。チャンバーの内部の様子は CCD カメラで撮影する。マイクロ波とカメラの干渉を遮断するために、撮影用の窓にメッシュを付けると共に、安全対策として実験システム全体に電磁シールドをかぶせる。

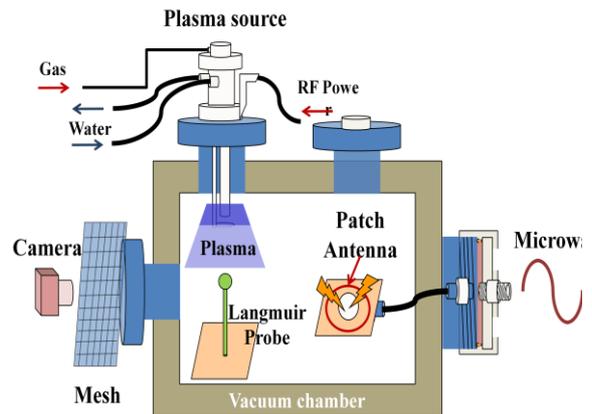


図 2. 実験システム

2-1. 真空チャンバー

真空チャンバーを図 3 に示す。真空チャンバー

は横 1150mm、縦 1000mm、高さ 750mm の方形をしている。



図3. 真空チャンバー

真空チャンバーには粗引き用ロータリーポンプとクライオポンプがつけられ、最大真空到達度として 10^{-6} [Pa] まで排気可能である。

2-2. マイクロ波発生装置

マイクロ波発振器を 図4 に示す。マイクロ波発振器はマイクロ電子株式会社製 MMG-604V 型、発振周波数 $5.8\text{GHz} \pm 15\text{MHz}$ である。公称で 0~400W までを連続可変で出力する事ができる。



Power supply unit

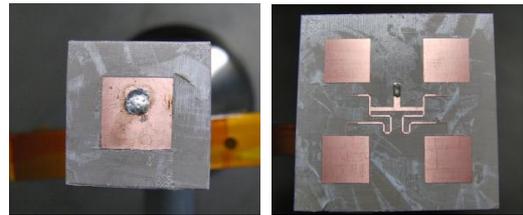


Oscillation unit

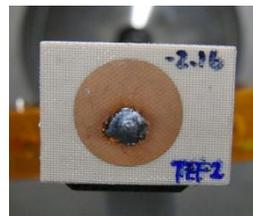
図4. マイクロ波発振器

2-3. パッチアンテナ

真空チャンバー中でマイクロ波を放射してその表面に放電現象が発生するかを観察するために、SSPS と同一周波数 5.8GHz のそれぞれ他の 4 種類のパッチアンテナをチャンバー中に配置した (図 5)。



(a) Patch antenna Teflon as substrate



(b) Patch antenna FR4 as substrate

図5. 5.8GHz パッチアンテナ

アンテナ基板の材料はテフロンとガラスエポキシ (FR4) で、パッチアンテナ設計方法^[4]によって製作した。

3. 実験方法

実験はプラズマ環境と真空だけの環境の 2 条件で行った。方形パッチテフロンアンテナと円形 FR4 アンテナは二つの条件皆で実験したが、円形パッチテフロンアンテナはプラズマ環境で、方形アレイアンテナは真空だけの環境で実験した。プラズマ環境では、 $2 \times 10^{12}/\text{m}^3$ 程度のプラズマ密度で実験を行なった。これは軌道上実証試験が先ずは低軌道で実施される予定であり、低軌道での最大密度程度を想定したものである。図6のように真空チャンバー内にパッチアンテナと Dipole antenna を設置した。Langmuir probe はプラズマ密度、Dipole antenna はパッチアンテナから放射されるパワーをモニターするためのもので、パッチアンテナから 10cm 離して設置した。

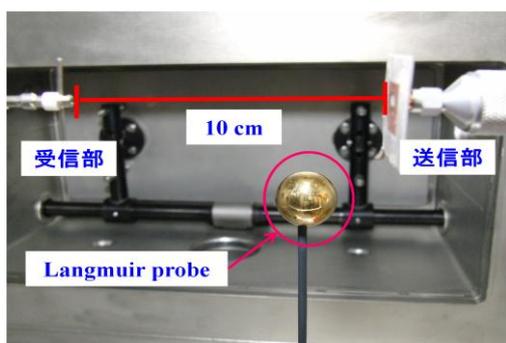


図 6 送信及び受信アンテナ

Dipole antenna で受信された電力はパワーセンサー(HP 8481B)とパワーメーター(HP 437B)で測定されて表示される. アンテナの温度を測定するために不可逆性サーモラベルを使った. マイクロ波の入力パワーを0から最大50[W]まで5分毎に5Wずつあげていながら放電が発生するかを観察した. 実験条件をまとめた表を表1に示す.

表 1 実験条件

実験	圧力[Pa]	材料	プラズマ密度
方形パッチ	3×10^{-2}	Teflon	$2 \times 10^{13}/\text{m}^3$
円形パッチ	3×10^{-2}	FR4	
円形パッチ	3×10^{-2}	Teflon	
アレイパッチ	8×10^{-2}	Teflon	$2 \times 10^{12}/\text{m}^3$
方形パッチ	4×10^{-5}	Teflon	真空のみ
方形パッチ	4×10^{-5}	FR4	
方形パッチ	4×10^{-5}	Teflon	

本稿では、アンテナ表面で発光が観察されることと、真空容器内の圧力が急激に上昇すること、の二つの事象が確認された時を、放電が発生したと定義する. 放電が発生することによって、ダイポールアンテナの受信電力の低下、反射電力の増加、アンテナ部分の温度上昇といった事象も同時に観測される.

4. 実験結果

実験結果をまとめたものを表2に示す. プラズマ環境下では、方形パッチテフロンアンテナで30[W]になった時、円形パッチテフロンアンテナで50[W]、円形パッチFR4アンテナで20[W]にな

った時に発光が見られた.

表 2 実験結果のまとめ

アンテナ	環境	入力 [W]	受信 [W]	現象
方形 Teflon	プラズマ	30	0.23	発光のみ
		35	0.24	1) 発光と圧力上昇 2) 受信パワー 0.01 になった
円形 FR4		20	0.024	1) 発光 2) 圧力上昇無し 2) 受信パワー 0.016 になった
円形 Teflon		50	0.7	1) 発光と圧力上昇 2) 受信パワー 0.02 になった
Array Teflon		40	1	発光のみ
方形 Teflon		30	0.11	1) 発光 2) 圧力上昇無し 2) 受信パワー 0.012 になった
円形 FR4	真空のみ	20	0.027	無し
Array Teflon	50	0.73	1) 発光無し 2) 受信パワーが 0.031 になった	

マイクロ波入力電力を更に増加させると放電と見られる強い光が維持された. その時の写真を図7に示す.



図 7 アンテナでの放電時の発光
円形パッチFR4アンテナでは、放電と思われる

強い光は維持されなかった。真空だけの環境では、方形パッチテフロンアンテナでのみ、約 30[W]になった時発光があり、且つダイポールアンテナに受信されるパワーが減少した。しかし他のアンテナでは発光は見られず、温度上昇だけが確認された。プラズマ中でマイクロ波を放射した時の、圧力変化のグラフを図 8 に示す。方形パッチと円形テフロンアンテナでは発光と同時に圧力上昇が観測されている。円形 FR4 アンテナで見られる圧力上昇は、発振機からの入力パワーをあげるとプラズマが消えるという事象が発生したためであると考えられる。

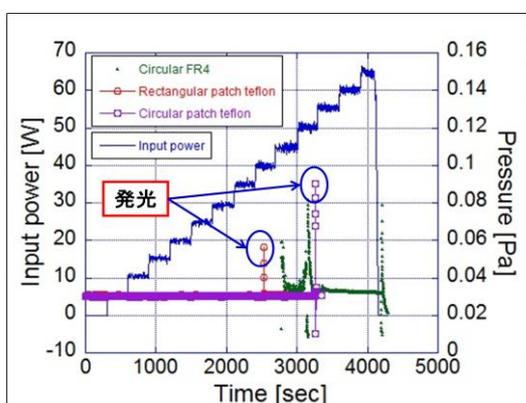


図 8 チャンバー内部の圧力変化

ダイポールアンテナで受信されるパワーの変化を図 9 に示す。

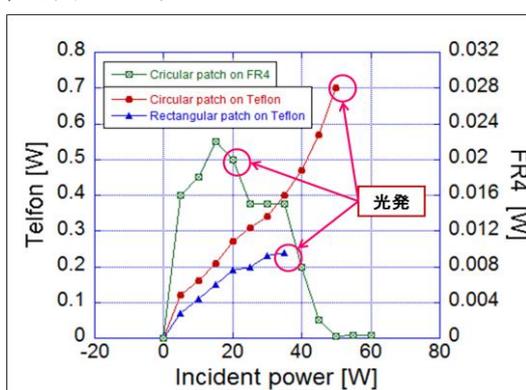


図 9 発光時マイクロ波源の入力パワーとアンテナへの受信電力の関係

図 9 で Power は、ダイポールアンテナで受信された電力、Incident Power はアンテナに供給されるマイクロ波電力である。放電が発生するまで受信

電力はほぼアンテナ供給電力に比例して直線的に増加するが、発光と同時に大きく減少している。放電によって発生した高密度プラズマにマイクロ波パワーが奪われていることを示唆している。

実験前後のサーモラベルの変化を図 10 に示す。温度は実験毎に少しずつ違うが約 90°C から 120°C まで上がった。



図 10 実験前後の温度変化

5. まとめと今後の課題

これまでのところ、プラズマ環境下では 30~50W の範囲で発光が確認されている。入力パワーと放電発生の関係が一定せず、以前の予備実験の結果では 10W 以下で放電が発生しているが、今回の結果はそれとは異なっている。今回の実験では入力パワーを 5 分間で 5W ずつ、ゆっくり入力させたが、以前の予備実験では入力電力を 1 分以内に 0.5W 程度ずつ小刻みに早く変化させた。また、プラズマ密度 $10^{14}/\text{m}^3$ 程度であった。このため、今回の実験とは条件が異なっている。今後は、各回の実験条件をできるだけ厳密に揃え、軌道上での運用状態に近づけることが必要である。

また、赤外線カメラでアンテナ表面の温度変化をリアルタイムで測定して、入力パワーと温度変化、受信電力、反射電力の関係等を観察すると共に、放電発生メカニズムについて考察を行なう。

参考文献

- 1) 佐々木進, JAXA における SSPS の研究状況と課題, 第 13 回 SPS シンポジウム講演要旨集, p29-33, (2010)
- 2) 三原荘一郎, USEF における SPS への取組み, 第 13 回 SPS シンポジウム講演要旨集, p34-39, (2010)
- 3) R.A.Kishek, Multipactor discharge on metals and dielectrics : Historical review and recent theories, Phys.Plasmas, Vol.5, No.5, (1998)
- 4) Balanis, "Antenna Theory : Analysis and Design", (2001), Wiley