

# 宇宙環境における高出力 RF 増幅器の放電現象に関する研究

山田穂高（諏訪東京理科大学機械電気工学科），田中孝治（宇宙航空研究開発機構），  
伊地智幸一（一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構），斉藤宏文（早稲田大学），  
大島政英（諏訪東京理科大学）

## Research on Discharge Phenomena of High-Power RF Systems in Space

Hotaka Yamada ( Suwa University of Science ) ,  
Koji Tanaka ( Japan Aerospace Exploration Agency ) ,  
Koichi Ijichi ( Japan Space Systems ) , Hirohumi Saito ( Waseda University ) ,  
Osima Masahide ( Suwa University of Science )

### Abstract

In this study, in order to develop a space-use kW class high-power amplifier, the discharge threshold was analyzed using an electromagnetic field simulator and a discharge simulator. Based on these results, a high-output amplifier with the output power of over several hundred W was developed and operated in a vacuum environment. In this simulation, the connector of the amplifier was modeled with and without coating, and the electromagnetic field strength and discharge threshold were measured by analysis. The discharge threshold analysis analyzed the coating thickness and the secondary electron emission coefficient of the coating material between the connector gaps. In the electromagnetic field analysis, the field strength was maximum at the tip of the stripline before and after the parylen coating. It was found that the discharge threshold increased with any thickness of coating between the gaps. Comparison of the secondary electron emission coefficients showed that smaller values tended to increase the discharge threshold earlier.

### 1. はじめに

現在、宇宙空間において人工衛星を用いた電波応用に関する研究開発が進められている。SAR（合成開口レーダー）衛星はマイクロ波を使用する観測衛星である。このシステムではkWクラスの電力増幅器を使用し、宇宙空間で60~100[W/m<sup>2</sup>]のマイクロ波放射が必要となる。図1にSAR衛星のイメージ図を示す。



図1 SRA 衛星イメージ [1]

マイクロ波を使用することで、雲などを透過して画像を取得できる特徴を持っている。本研究の目的は SAR 衛星等で使用する高出力増幅器の開発のために、宇宙空間における大電力システムの放電現象の解明を行うことである。宇宙環境における RF (Radio Frequency) システムの放電現象としてはマルチパクタ放電やアウトガスによる気中放電が考えられる。本研究では解析と実験により高出力増幅器周辺における放電現象の閾値評価を行い、高出力増幅器の真空・真空プラズマ環境中での動作試験を行った。

## 2. 放電解析

放電解析において、電磁界解析および放電閾値解析を行った。条件としてモデルのコネクタと誘電体・ストリップライン間のギャップを $100[\mu\text{m}]$ 、放電閾値解析においては二次電子放出係数の比較を行った。さらに、コネクタモデルにパリレンを模擬したコーティングモデルを作成し、比較を行った

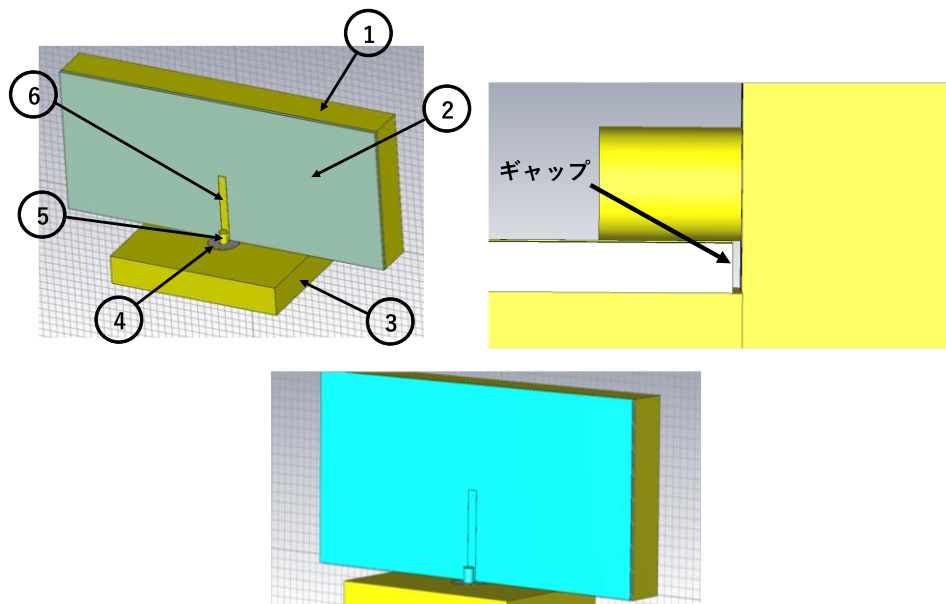


図2 コネクタモデル

まず、電磁界解析では、コネクタモデルと表面にパリレンを用いたコーティングした時のモデルの比較を行ったところ、電界強度が半減したことがわかった。

次に、ギャップ間にコーティングを $0.05\text{mm}$ ずつ埋めていき、電磁界強度の変化を確認した。その結果、コーティング厚さを増やしていくことによって電界強度の現象が見てとれた。

ストリップライン先端で考えられる放電としてコーティング前では金属・絶縁体・真空が存在するトリプルジャンクションが存在するため沿面放電が発生すると考えられる。図4にトリプルジャンクションの箇所を示す。

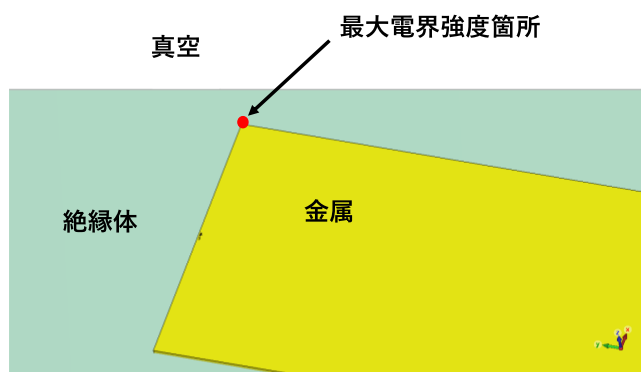


図4 トリプルジャンクション

また、コーティング前後にて、ストリップラインの先端に角が存在し、局所的に電界が強くなることからコロナ放電の発生可能性がある。次に、放電閾値の解析を行った。この解析では二次電子放出係数などの設定を行えるが、パリレンの特性値が明確にされていないため、放電において重要である。二次電子放出係数の比較を行った。コーティング前での放電解析において、スタブと土台間にて電子の増加が見られるため、マルチパクタ放電が考えられる。ギャップ間にコーティングを埋めていき放電閾値の変化を二次電子係数の比較とともに行っていった。

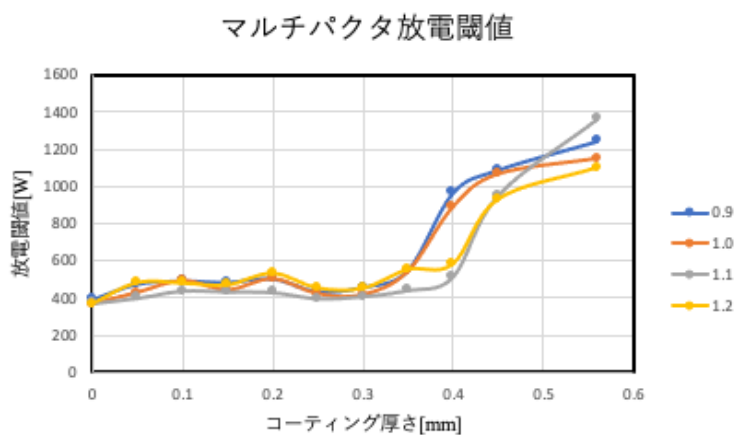


図5 放電閾値とコーティング厚さの関係

図5を見るに、ある厚さに達すると放電閾値が大きく上昇することがわかった。これは、ギャップ間距離の減少により交流電界による電子の加速が少なくなるため、一次電子のエネルギーが少なくなり、コーティング表面から放出される二次電子が減少するためと考える。よってギャップ間のコーティングは必須であると考え、以上の結果から、高出力増幅器の研究開発を行うため、実際に高出力増幅器を真空空間で動作させ、解析による放電閾値が正しいものかを実験によって検証した。

### 3. 真空試験

#### 3.1. 実験概要

本研究では600[W]増幅機を開発し宇宙環境を模擬した真空チャンバーを使用して実験を行った。放電現象の観測には光学カメラを用いた。さらに、パリレンを用いたコーティングを施した増幅器を用いて真空プラズマ空間で試験を行った。

#### 3.2. 実験装置

本研究で使用した真空プラズマ試験装置の構成を図5に示す。SGによってRFを出力させ、FG及びパルス制御基盤でパルス制御を行い、前段増幅器を経て高出力増幅器を真空中で動作させ、PMにて出力を確認した。また、後方拡散プラズマ発生器を用いてアルゴンプラズマを生成し、電離層プラズマを模擬して実験を行った。

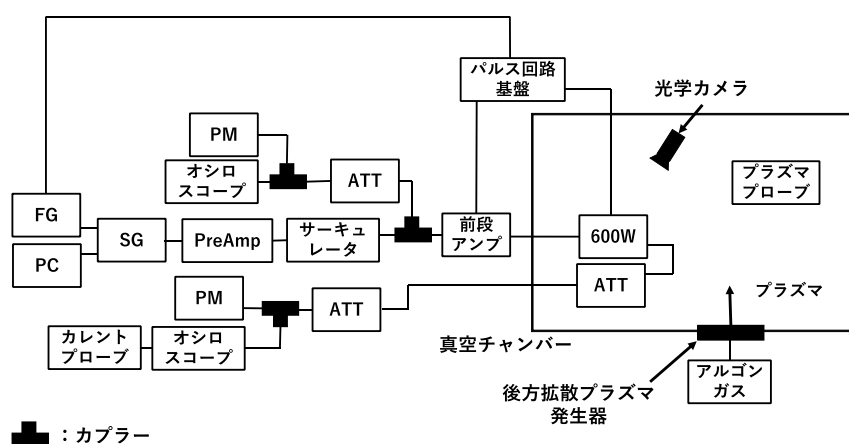


図6 実験装置

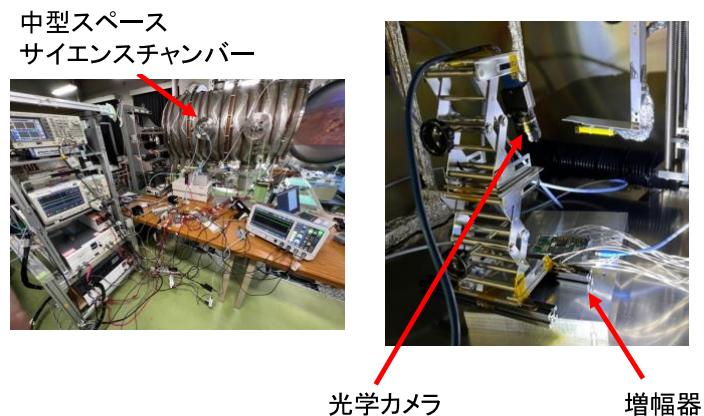


図9 実験の様子

#### 4. 実験結果及び考察

600W増幅器の真空プラズマ試験の増幅器の出力計測値を以下に記す.

表1 真空プラズマ試験結果

SG出力[dBm]	600Wアンプ出力[dBm]	出力[W]
-4	54.97	314.1
-2	55.55	358.9
0	55.9	389.0
2	56.07	404.6
4	56.08	405.5

真空プラズマ試験において、放電現象を確認できなかった。これは、入出力側のコネクタ部及びデバイス周辺において放電閾値に達していないためと考える。放電閾値の解析結果と比較すると、妥当な結果となった。

#### 5. 結論

電磁界解析においてストリップライン先端で電界強度が最大となり、沿面放電やコロナ放電が発生する。また、ギャップ間にコーティングを行った際にあるコーティングの厚さに達した時放電閾値が増加した。また、二次電子放出係数の比較では、値が小さいと二次電子の放出が少ないということがわかった。

真空・真空プラズマ試験において、高出力増幅器の宇宙環境を模擬した環境での動作確認を行った結果、放電現象の確認はなく、解析結果と比較して整合性の取れたものとなった。

## 6. 参考文献

- [1] 小型 SAR 衛星, Synspective,  
<https://synspective.com/jp/satellite/>