

## 大電力放射アンテナの放電に関する研究

### Experiment on Discharge of Large Power Radiation Antenna

太田 大智<sup>1</sup>、伊地智 幸一<sup>2</sup>、田中 孝治<sup>2</sup>、齋藤 宏文<sup>2</sup>

1 東京理科大学、2 JAXA

#### 1 はじめに

##### 1.1 概説

SPS (Solar Power Satellite-太陽発電衛星) や SAR (Synthetic Aperture Radar-合成開口レーダー) の送電部として期待されているフェーズドアレイアンテナでは数百～数千  $W/m^2$  の電力放射が要求される。この大電力マイクロ波と宇宙環境の相互作用によって放電現象が懸念される。

この放電現象によって衛星の電力低下や最悪の場合、運用不能に至ることがある。実際、宇宙環境に起因する衛星事故のうち約半数が放電または帯電に関係している。[1]放電による衛星事故を未然に防ぐため本研究では宇宙機搭載用大電力マイクロ波システムにおける放電を調べ放電開始条件を調べることで送電部設計の知見を得ることを目的とする。

##### 1.2 SPS

SPS は宇宙空間に太陽光パネルと送電アンテナを展開し地上にレクテナと呼ばれる受電アンテナを設置することで地上での電力供給を可能とする構想段階の宇宙機である。宇宙空間で太陽光発電を行うので天候の影響を受けずさらに昼夜問わず 24 時間発電できる利点がある一方、受電した電波を電力に変換する送電効率の向上や一辺 2km 四方の大規模な建造物を構築するための打ち上げコストが課題として挙げられる。また SPS の信頼性を担保するために太陽光パネルや送電アンテナにおける損傷、破壊への対処が必要である。

SPS の概略図を図 1 に示す。発電電パネルを一体化させている点が特徴であり複数 (テザー) によって吊り上げる構造となっている。現在、100 万 kW 級の SPS を 21 世紀後半に実現を目標としている。

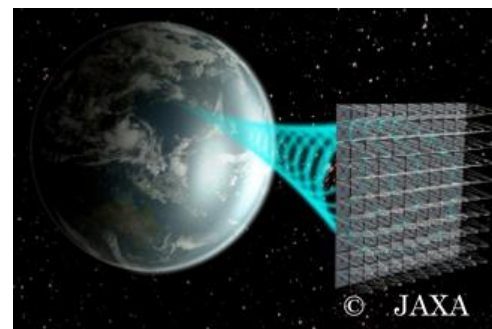


図 1 SPS

##### 1.3 SAR

SAR は人工衛星や航空機に搭載することで地表面の様子を高分解能で観測することができるレーダーシステムである。マイクロ波やミリ波を地表に向かって放射させ反射してきた電波をとらえることで地表面の観測を可能としている。可視光と比較して波長が長いマイクロ波は雲などに散乱されず電離層を透過するので天候や昼夜を問わず観測できる一方、分解能は波長の長さに反比例するのでマイクロ波を用いる場合は分解能を向上させる必要がある。そこで小さなアンテナを衛星等に搭載させ衛星軌道上を移動させることで仮想的に軌道上に小さなアンテナが複数並んだ状態、すなわち一つの大きな開口面を持ったアンテナを実現させ分解能を向上させている。

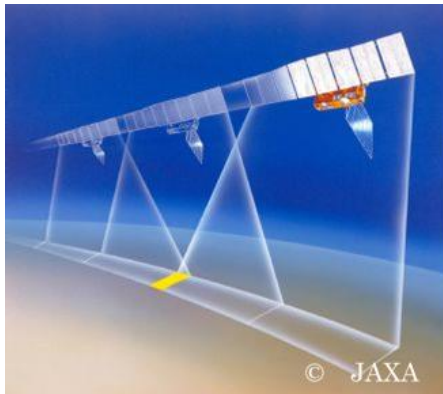


図 2 SAR

## 2 放電現象について

### 2.1 放電の一般論

放電現象は気体のような絶縁体が種々の原因により絶縁破壊されその絶縁状態を保つことができなくなることである。放電現象の主要因としてあげられるのは絶縁体内部での電子の増加である。電子増加の過程も多岐にわたるが代表的なものとして電界によって加速された電子が中性粒子などと衝突することにより電離が生じ電子が増加する電離作用や電子が壁面に衝突することで壁面内部の自由電子を叩き出す二次電子放出作用があげられる。放電現象は発生条件や状況によって分類されるが本研究では気体中にて発生するグロー放電と真空中の高周波電界によって発生するマルチパクタ放電に焦点を当てている。

### 2.2 気体中の放電

図 3 のように平行平板に電界をかけたモデルを考える。極板間の電圧が低いときは偶存電子による電流が流れるのみで放電には至らないが電圧が増加すると電界によって加速された電子が中性粒子を電離させる。さらに電圧を高くすると電離作用が盛んになり火花を生じて絶縁破壊に至る。この放電現象をグロー放電と呼び、発光や温度の上昇を伴う。グロ

ー放電は電子と中性粒子の散乱確率に依るので気体の圧力や極板間の距離で放電開始電圧が決まる。

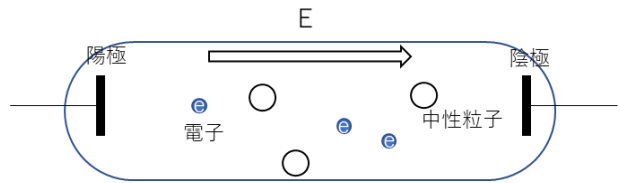


図 3 平行平板モデル

### 2.3 真空中の高周波放電

真空中では電子の平均自由行程が極板間の距離より長いので電離作用が起きにくい。一方、電子は電界に加速され続けるので高いエネルギーを持って極板に衝突することになる。この時加速された電子により二次電子が発生し電子が増加する。高周波電界であったとき位相が逆転すれば電子は逆方向の極板に到達し再び二次電子を叩き出す。以上の過程を繰り返すことで電子はねずみ算的に増加し放電現象に至る。放電開始条件は電子の極板間走行時間が高周波の半周期に等しいことと電極の二次電子放出係数が 1 以上である。[2]

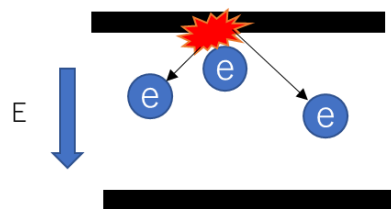


図 4 二次電子放出

## 3 実験装置

本実験では図 5 の小型 SAR の EM アンテナパネルについて放電実験を行った。

このアンテナは小型 SAR の RF 系を構成するアンテナであり軌道運用時にパネルに入力する最大電力は 500W である。本実験では 100W から 500W、700W、運用時の最大電力の 2 倍である 1000W まで電力を変化させた際の放電現象の有無の確認をした。また運用時の周

波数は 9.65GHz 中心であるので 9.5GHz、9.65GHz、9.8GHz の周波数帯で実験を行った。さらに真空度は  $1.0 \times 10^{-3}\text{Pa}$  以上、 $1.0 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 、 $1.0 \times 10^{-1}\text{Pa}$  の 3 条件で行い真空度の影響を調査した。

実験構成は図 6 に示す。片翼 4 枚アンテナパネルの各パネル 1 枚ずつについて放電実験を実施し、放電には発光や温度上昇が伴うので光学カメラやサーモビューワーで放電現象を観測した。

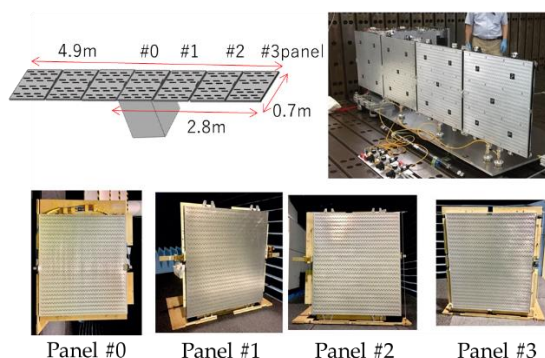


図 5 小型 SAR アンテナパネル

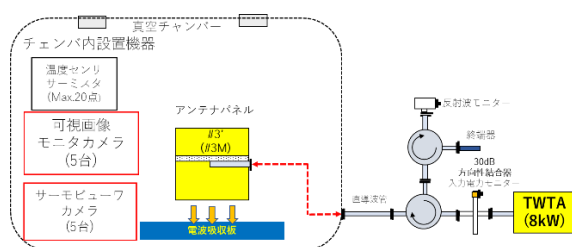


図 6 実験コンフィギュレーション

#### 4 実験結果・考察

##### 4.1 実験結果

いずれの真空度でもパネル #3 のみに放電が確認された。発光の様子を図 7 に示す。放電開始の入力電力は 143W であり別の #3 パネルで放電実験を行っても放電箇所の違いはあるものの放電が確認された。電力の上昇とともに発光の数が増加した。またサーモビューワーによる温度の変化は観測されなかった。さ

らに放電実験後、放電箇所を顕微鏡で観察したが顕著な違いは見られなかった。

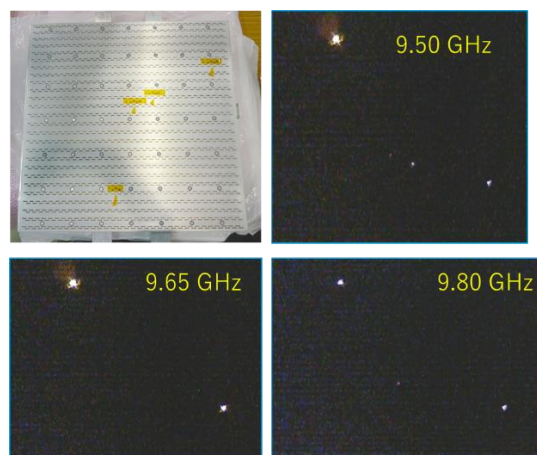


図 7 放電による発光

##### 4.2 考察

本実験で確認できた放電現象の発生機構について考察する。

まずマルチパクタ放電の可能性について考える。図 8 にマルチパクタ放電の発生開始電圧 [3] を図 9 にスロットアンテナの拡大図を示す。放射スロットのサイズが  $2 \times 15\text{mm}$ 、1 スロットあたりの RF 電力が 0.2W である。したがって各スロットにおける平均電界は  $16\text{V/cm}$  であり  $2\sigma$  値が  $52\text{V/cm}$  である。したがって各スロットにおける電力密度のムラを考慮してもマルチパクタ放電開始電圧よりも二けたほど低いのでマルチパクタ放電の可能性は低いと考えられる。

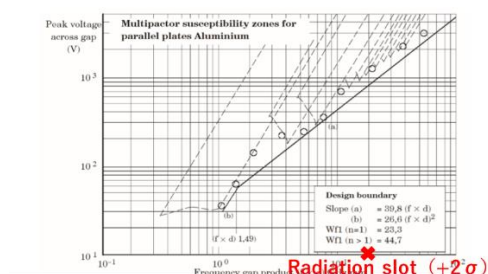


図 8 マルチパクタ放電開始電圧

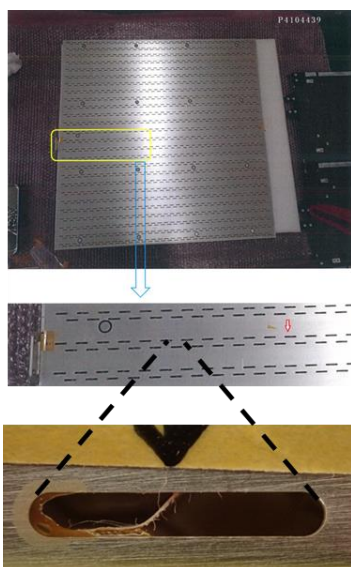


図 9 スロットアンテナ拡大図

次に気体中の放電の可能性を考える。図 10 に気体中の高周波放電開始電圧を示す。[4] 図 11 より約 1GHz、圧力 1 Torr、極板間距離 53 mmにおいて放電開始電界は 50-70V/cmである。またパッシェン則より放電開始電圧は圧力  $P$  と極板間距離  $d$  の積または周波数  $f$  と圧力  $P$  の商の関数である。したがってパッシェン則を本実験に拡張すると

$$Pd = 1\text{Torr} \times 53\text{mm} = 10\text{Torr} \times 5.3\text{mm}$$

$$f/p = 1\text{GHz} \times 1\text{Torr} = 10\text{GHz}/10\text{Torr}$$

となるので周波数 9.65GHz ( $\approx 10\text{GHz}$ )、距離 2 mm ( $< 5.3\text{ mm}$ ) の条件下では圧力 10Torr ( $\approx 1.3 \times 10^3\text{ Pa}$ ) で放電が発生すると考えられる。しかし本実験では最も悪い真空度でも  $1.0 \times 10^{-1}\text{ Pa}$  であるのでアンテナからのアウトガスが考えられる。一方、ハニカムスロットアレーアンテナ (図図図) はノーメックスコアを使用しており気体の透過性が高いので悪い真空度が維持されるかどうか疑問点である。

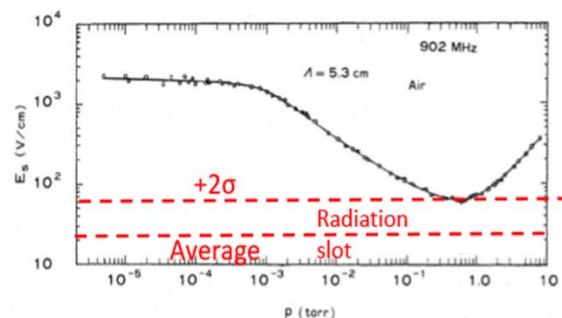


図 10 高周波放電発生電界

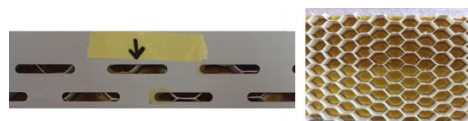


図 11 アンテナのハニカム構造

## 5 今後の展望

本実験の段階では確認された放電の発生機構を解明することができなかった。したがって真空度の影響などについてさらに精査するとともに発生した放電現象によって RF 系統に影響が及ぼされるかどうかについて実験する必要がある。またマルチパクタ放電の発生条件について具体的に議論するために電子銃を用いた二次電子放出係数計測実験や種々の材料によって壁面をコーティングされた冶具における放電開始条件を観測する実験を現在行っている。

## 参考文献

- [1] 渋. 一晃, “二次電子放出特性の解析,” 2012.
- [2] 武田進, 気体放電の基礎, 1979.
- [3] ECSS, “Space engineering Multipaction design and test,” 2013.
- [4] 武田進 (中部大学電気工学科), “真空中の高周波放電,” 1987.