大電力マイクロ波放射用のアンテナで発生する放電現象の観察

# Observation of Discharge Phenomena on High-Power Microwave Antenna

○阿久津壮希<sup>1</sup>,太田大智<sup>1</sup>,山岸 稜也<sup>1</sup>,伊地智幸一<sup>2</sup>,齋藤宏文<sup>3</sup>,齋藤智彦<sup>1</sup>,田中孝治<sup>4</sup>
<sup>1</sup>東京理科大学,<sup>2</sup>一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構,<sup>3</sup>早稲田大学
<sup>4</sup>総合研究大学院大学・宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所

## 1. 序論

### 1.1 宇宙機における大電力マイクロ波システム

我々は、宇宙機における大電力マイクロ波シス テムについて研究を行なっている。本研究では、 アンテナから数 100 W/m<sup>2</sup> の電力を放射する宇宙 機搭載用マイクロ波システムを指す。以下に、大 電力マイクロ波システムの2 例を紹介する。

まず、最初に太陽発電衛星 (SPS) 凹である。SPS は、アメリカやヨーロッパ、日本など様々な国で 多様なモデルが開発された。その多くは、静止軌 道上で太陽光発電を行ない、その電力をマイクロ 波に変換し地上に送電するシステムである。SPS は、宇宙空間で太陽光発電を行なうため、様々な メリットがある。例えば、地上とは違い天候や昼 夜に依存することなく発電が可能である。そのた め、現在の化石燃料に頼り切ったエネルギー問題 の解決への一つとして期待されている。その中で、 我々は図1に示すような発送電一体型テザーモデ ルについて研究を行なっている。このモデルは、 2.4×2.6kmの超巨大建造物で、発電能力は2GWの 想定である<sup>[2]</sup>。そのため、アンテナは約300 W/m<sup>2</sup> の電力を放射する想定である。

次に、合成開口レーダ (SAR) 衛星を紹介する。 SAR 衛星は、マイクロ波を用いて地上の観測を行 う。その1例として、現在運用されている小型 X バンド SAR 衛星がある。将来的には 20 機程度の 衛星が運用を開始し、多数機コンステレーション 技術を用いた同一地点の常時観測化や震災時の即 時観測化を可能にするとして期待される<sup>[3]</sup>。

# 1.2 研究目的

大電力放射用アンテナにマイクロ波を入力した 際、図2のような発光が確認された。宇宙機内で 放電が起きれば、最悪の場合運用不能に陥ったケ ースもある。そのため、放電抑制の技術は宇宙機 に対して重要な課題である。その一方で、大電力 マイクロ波システムの放電現象は未解明な部分も 多い。大電力マイクロ波システムを安定的に運用 するためにも、その知見を得る必要がある。

我々は、室内実験から放電現象機構を解明し、 放電抑制方法の確立を目的とし、研究している。



図1 発送電一体型テザーモデル



図2 大電力放射用アンテナと放電光

### 2. 大電力放射用アンテナと放電現象

大電力放射用アンテナでは、主に2種類の放電 メカニズムが考えられる。1つは、気体放電である。 気体放電は、電界によって加速された電子が気体 分子と衝突し、気体分子が電離することによって 発生する。気体放電にも複数種あり、不平等電界 中で発生するコロナ放電や気泡(ボイド)などの 閉じられた系で発生するボイド放電などがある。

もう一つは、マルチパクタ放電である。マルチ パクタ放電は、高周波環境下での共振現象として 発生する。交流電界中で加速された電子が表面材 料に衝突する。このとき、電子が適当なエネルギ ーを持っていると、表面材料から二次電子が放出 される。これを繰り返すことによって、電子がね ずみ算式に増え、放電に至る。

上記のような放電機構によって、抑制方法も異 なる対策が必要である。例えば、気体放電の場合 はアウトガスや気泡などの空気分子の供給源を削 減することが必要である。一方で、マルチパクタ 放電の場合は二次電子放出係数が低い表面材料な どを用いることが必要となる。つまり、放電抑制 方法を確立するためには、放電機構を解明するこ とが重要である。

### 3. 実験手法

本稿では、放電抑制方法の確立のために、我々 が取り組んでいる実験手法を記す。本実験で用い た大電力放射用アンテナは図2に示したスロット アンテナである。



図3 本実験のコンフィグレーション

図 3 に本実験のコンフィグレーションを示す。 本実験は、大電力マイクロ波入力系と放電観察系 に分かれている。マイクロ波を生成するために SG (Signal Generator)を用いた。そのマイクロ波をFG

(Function Generator) によってパルス波に変調し、 TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier) にて増幅し た。TWTA は最大デューティ比 5%でパルス動作を 行う。ATT (Attenuator) によって、大電力放射用 アンテナに入力する電力を制御する。TWTA の帯 域制限により、8-10GHz の X バント帯に関して、 任意の周波数と電力 (8kW まで)を入力すること が可能である。本実験では 9.5~9.8 GHz, 30~1500 W まで入力した。

次に放電観察系であるが、こちらも大きく分け て2つある。光学的観測系と電波的観測系である。 光学的観測系にはモニタ TV カメラと光学カメラ を用いた。モニタ TV カメラは広角な画角を持ち、 6 つ用いることで図 4 のようにアンテナ全域を観 察することが可能である。また、Video Capture を 用いることで、モニタ TV に映し出された画像の 記録が常時可能である。

モニタ TV カメラでは放電光が確認できるため、 放電の発生が分かる。その一方で、モニタ TV カ メラでは 2 次元的な判断のみしかできない。つま り、放電箇所の詳細な知見を得るためには、細部 観測のための光学カメラを用いる必要がある。光 学カメラは、モニタ TV カメラよりも画角が狭い。 その分、画素数や感光度、接写リングなどを用い た撮影方法の自由さなどのメリットがある。



図4 モニタ TV カメラによるアンテナ全域の観察

放電箇所がモニタ TV カメラによって特定され れば、図 5 のように光学カメラを放電箇所にフォ ーカスして設置することが可能である。今回は、 放電現象の接写を試みた。また、従来よりも光源 の数を増やすことによって、F 値やフレームレー トを大きくした。そうすることで、被写界深度の 深い画像の取得やデータの取得条件の調整が可能 となった。



# 図5 チャンバ内の様子

放電現象が視認できない箇所で起こる場合を考 慮し、電波的観測系を用いた。放電現象から放出 される電波を観測するために、受信用のアンテナ を用いて、それを RTSA (Real Time Spectrum analyzer) と OSC (Oscilloscope) にて検知した。

# 4. 実験結果

本稿では、光学的観察系の結果を主に記す。図6 のように、モニタ TV カメラにて放電現象を観測 した。そのため、放電箇所を二次元的に特定し、光 学カメラによる詳細な観察を行なった。その結果 が図7である。図7は1.5kWのマイクロ波を入力 した際に観測した放電現象である。

これらの結果から、入力する電力や周波数を変 化させても放電箇所が変化しないことが分かった。



図6 モニタ TV カメラで捉えた放電現象



(a) 9.5 GHz



#### (b) 9.65 GHz

#### 図7 光学カメラで捉えた放電現象

一方で、図7を比較すると入力する周波数を変 化させると光量に変化が見られた。このことか ら、放電箇所に周波数依存性はないものの、光量 は周波数依存性があると言える。また、図7より 放電現象はアンテナ内部で発生していることが分 かった。光学カメラでは、161 Wの入力電力で放 電現象を確認した。つまり、数 100 W/m<sup>2</sup>で現在 も運用されている大電力マイクロ波システムにお いて、放電する可能性は高いと言える。

# 5. 考察

放電箇所のスロットを観察すると、図8のよう にハニカムコアのケバが随所に見られた。アンテ ナパネルを構成するハニカムコアの切断面のケバ は製造上やむを得ず、また放電現象との相関は確 認されていないが、電界が集中する要因とも考え られる。

また、内視鏡を用いて放電箇所のスロット内部 を観察すると、ハニカムコアや電波吸収体のくず、 複数の気泡が見られた。気泡は気体分子の供給源 となると考えられ、気泡を要因として気体放電が 発生している可能性がある。



図8 放電箇所のスロットとケバ 我々は、同一形状の大電力放射用アンテナを9 枚用いて、室内実験を行なった。内2枚は2,3日、 他7枚は2週間のベーキングを施した。2,3日間 のベーキングを行なったアンテナパネルでは図7 のような放電現象が確認されたものの、2週間の ベーキングを行なったアンテナパネルについては、 放電現象が確認できなかった。つまり、今回観測 した放電現象は気体放電に依る可能性が高い。更 には、ある程度長期的なベーキングが放電現象の 抑制に効果的であると言える。また、気体放電で ある可能性が高いため、気体分子の供給源となる 気泡などを減らすことも、放電現象の抑制に効果 的であると言える。

# 6. 結論

大電力放射用アンテナにて、161 W の入力電力 で放電現象を確認した。そのため、通常運用され るマイクロ波システムにおいても放電する可能性 は高いと言える。また、放電抑制方法の1つとし て長期的なベーキングが有効である。今回の放電 現象は気体放電である可能性が高く、気体分子の 供給源である気泡を減らすためにも、接着剤シー トなど製作工程の見直しが必要である。

# 7. 参考文献

[1] P. Glaser, Power from the Sun ; Its Future, Science, no. 162, 1968.

- [2] 篠原真毅, 現在電子情報通信選書『知識の森』 宇宙太陽光発電, 株 式会社オーム社, 2012.
- [3] ImPACT, "オンデマンド即時観測が可能な小型合成開口レーダ衛星 システム," 2014. [オンライン].