

大電力用アンテナの放電現象

Discharge phenomena of High Power Microwave Antenna

○阿久津壮希¹, 太田大智¹, 伊地智幸一², 齋藤宏文³, 齋藤智彦¹, 田中孝治⁴

¹東京理科大学, ²一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構, ³早稲田大学

⁴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

現在、マイクロ波は宇宙空間との通信用電波としても用いられている。これはマイクロ波が電波の窓という周波数帯で、地上と宇宙空間の間に存在する電離層や大気ガスなどによる減衰が少ないためである。以下に2つの宇宙機における大電力マイクロ波システムを紹介する。

1.1.1 SPS (宇宙太陽光発電衛星)

SPSは1968年にP.E. Glaser博士によって提唱された発電システムである。^[1] 宇宙空間に巨大な太陽光発電衛星を建設し、発電した電力をマイクロ波(もしくはレーザー光)に変換して無線送電したのち、地上でその電力を活用する構想である。

SPSの大きな長所は、宇宙空間で発電するため、時間や天候に依存せずクリーンな電力が供給できる点である。そのため、化石燃料枯渇問題や環境問題解決への糸口になると期待される。

これまでに発祥の地アメリカを始め、ヨーロッパや日本、中国などで様々なモデルが考案された。マイクロ波を用いる場合には電波伝搬理論と経済性から、大きさにして数km、重さ数万t程度、地上で100万kW以上の電力を利用する設計が多い。例えば、日本で設計研究が進められている発送電一体型テザー方式は 2.4×2.6 kmの大きさで約2GWの発電能力(地上では1GW)が備わる想定である。^[2] このモデルは太陽面に太陽電池を取り付け、内部でマイクロ波に変換し、裏面のアンテナから地上へ送電するシンプルな構造を取る。また、アンテナからは数百 W/m^2 といった大電力

マイクロ波を放射する。構造上、SPSを実現するには様々な課題がある。超巨大構造物を宇宙に建設するため、打ち上げのコストや無人建設技術は主要課題である。さらに、送電の効率向上や環境への影響評価が必要とされる。

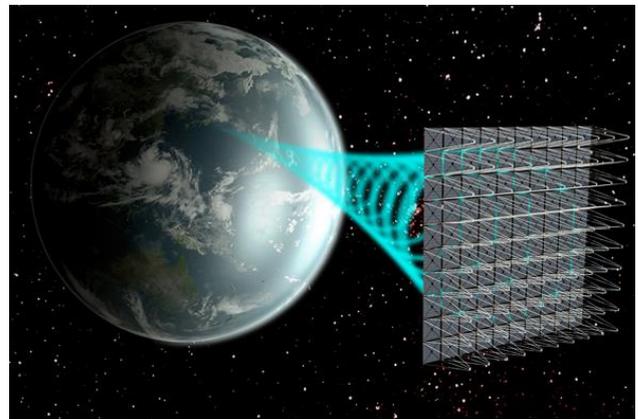


図1 発送電一体型テザーモデル

1.1.2 SAR (合成開口レーダ) 衛星

全地球規模のデータ観測は、大規模自然災害の早期確認、環境破壊の定期的観測、経済活動のためのビックデータ化など、周期的に集積し解析する必要性が高まった。そこで、人工衛星を用いて宇宙空間から地球環境の情報を得ることが考案された。現在、天候や昼夜を問わずに観測が行えるSARが有力なセンサとして、様々な衛星やスペースシャトル、航空機に搭載され世界各国で利用されている。SARはマイクロ波を用いて、昼夜天候を問わず地表のデータを得ることが出来るためである。これがSAR衛星の大きな長所である。

船舶、都市構造や森林など様々な地球環境の観測に用いられているが、今後は災害時などの緊急を要する、即応型地表観測に用いる想定もある。

SAR 衛星は、同一地点の観測は回帰日数の関係により 1 機の衛星では常時観測が難しい。そのため、20 機ほどを打ち上げ、多数機コンステレーションという技術を用いて、主要大都市部を数時間おきに観測する想定もある。^[3] これら想定の実現には低コスト化が必要であり、衛星の小型軽量化が臨まれる。

1.2 宇宙機と放電現象

放電・帯電現象は宇宙環境による人工衛星故障原因の半数以上を占める。^[4] また、放電によって人工衛星が運用不能に陥ったケースも報告されている。しかし、プラズマ環境下や真空状態における放電現象には不明点があり、SPS や SAR 衛星などの大電力マイクロ波システムを安定して運用するには、放電現象のメカニズム解明と抑制方法の確立が必須かつ早急に求められる。本研究では、大電力用アンテナを用いて放電現象のメカニズム解明に努めた。以下にプラズマ環境下で起こる 2 種類の放電現象について紹介する。

1.2.1 マルチパクタ放電

電子が材料表面に衝突すると二次電子が生じる。交流電界中では、電子がさらに加速され、再度材料表面に衝突し、二次電子放出によって、ねずみ算式に電子数が増加する可能性がある。このような条件が成立するとき、マルチパクタ放電に至る。

そのため、マルチパクタ放電を抑制するには、表面材料に二次電子放出係数の低い物質を使用するなどの対策が必要である。

1.2.2 気中放電（グロー放電・コロナ放電）

電界によって加速された電子が気体分子に衝突することで電離し、電子が増加する。これを繰り返すことによって空間に電流が流れ、気中放電に至る。

そのため、気中放電を抑制するには在留気体を減らすベーキングやアウトガスによりデバイス内の真空度を高く保つことなどが気中放電の対策例として挙げられる。

2. 実験手法

2.1 実験に用いた大電力用アンテナ

実験に用いたスロットアレイアンテナを図 2 に示す。アンテナ裏面には給電用導波管（WR90）が取り付けられており、対のカップリングスロットを通してアンテナ内部にマイクロ波が入力される。また、2 枚のアンテナ平行板の間には誘電体ハニカム構造があり、それを固定するために接着剤シートを用いている（図 3）。

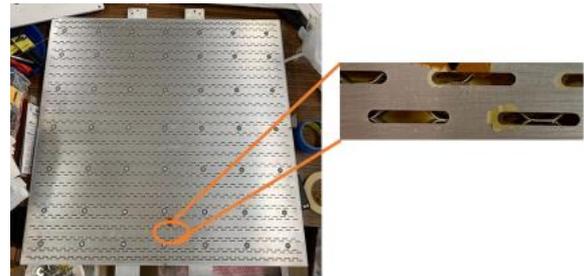


図 2 大電力用アンテナとスロット

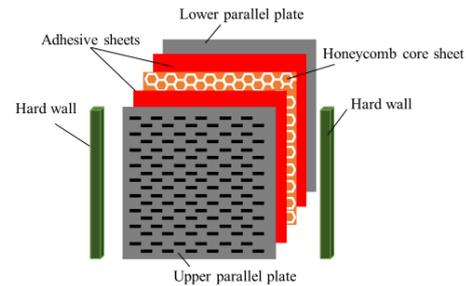


図 3 アンテナの層構造

2.2 実験コンフィグレーション

図 4 に実験コンフィグレーションを示す。SG（Signal Generator）を用いて任意の周波数のマイクロ波を生成し、TWTA（Traveling Wave Tube Amplifier）にて、そのマイクロ波を 68 dB 増幅させ、減衰器（Attenuator: ATT）を用いて入力電力の調節を行った。調節されたマイクロ波は真空窓（Feedthrough: FT）を通り、アンテナに入力される。

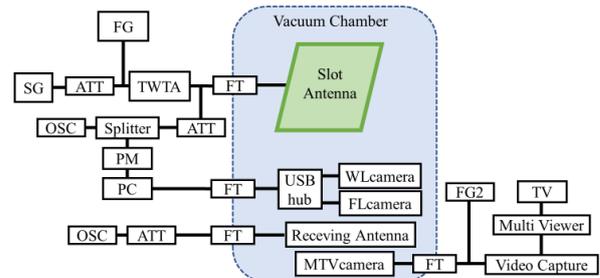


図 4 実験コンフィグレーション

放電現象を確認する装置は以下の通りである。

- ①放電箇所特定のためのモニタ (MTV) カメラ、
- ②放電の様子を詳細に観察する 2 種類の光学レンズ、
- ③入力電力や反射 (透過) 電力を数値化するパワーモニタ (PM)、
- ④入力波形や反射 (透過) 波形を観察するオシロスコープ (OCS)、
- ⑤放電から発生する電磁波を受け取る受信用アンテナの 5 種類を用いて放電現象の確認を行った。まず、放電の有無をこれらの装置で確認を行い、放電が起きていれば MTV カメラにて放電箇所の特定を行った。次に光学レンズを取り付けた CMOS カメラを再設置し、放電の様子を詳細に観察した。また、実験は 9.5, 9.65, 9.8 GHz のマイクロ波を入力電力 120 ~ 800 W に設定し、真空度 10^{-3} ~ 10^{-4} Pa の条件で同一形状の 2 枚のアンテナを用いて実験を行った。



図 5 マイクロ波入力系とその他設備

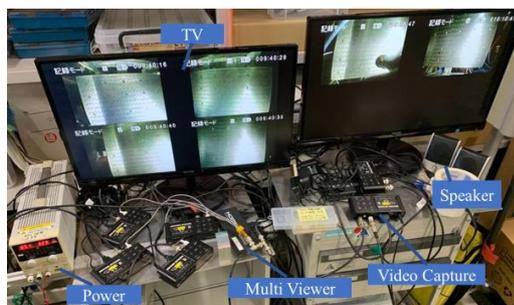


図 6 MTV カメラ映像系

3. 光学系の検討

放電の様子を詳細に確認するために用いた CMOS カメラに関して下記の検討を行った。CMOS カメラの場合、①撮影範囲とレンズの仕様を考慮した CMOS イメージセンサの大きさ、②有効画素数と空間分解能、③露光時間等の感度などを検討した。レンズの場合、①レンズの役割を決める焦点距離、②画像の明るさに起因する F 値、

③最短撮影距離 (本実験では真空チャンバー内のため制約がある)、④撮影範囲に起因する画角などを検討した。他にも、①鮮明に写る奥行き範囲を指す被写界深度 (DOF) や②接写を可能にする接写リング、③露光時間を決めるシャッタースピードなどの検討も行った。

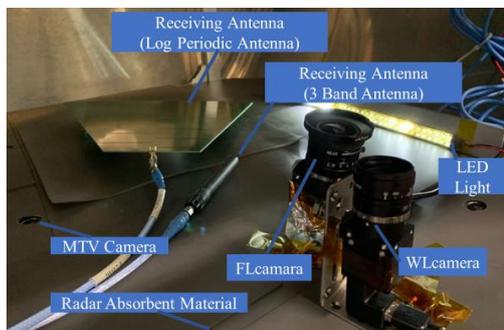


図 7 真空チャンバー内

表 1,2 に採用した CMOS カメラと単焦点レンズの詳細を示す。スロットを数個写すことが出来る撮影範囲に設定し、理想的な画角や焦点距離を求めることで、それに近い値のレンズを採用した。また、放電の詳細と広い撮影範囲のために二種類のレンズを使用した。

表 1 採用した CMOS カメラ

	1/2.5 CMOS	1/3 CMOS
イメージセンサ [mm ²]	5.7 × 4.3	4.8 × 3.6
有効画素数 [px]	5 M	0.3 M
感光度 [V/lux・sec]	1.4	4.8

表 2 採用した単焦点レンズ

役割	広角	魚眼
	詳細確認用	広域確認用
焦点距離 [mm]	10	3.5
F 値	2.2 ~	1.6 ~
最短撮影距離 [cm]	10	10
撮影範囲 ^{※1} [cm]	5.7 × 4.3	16 × 12
最小検出サイズ [mm]	0.088 / 0.30	0.25 / 0.86
DOF ^{※1} [cm]	10 ~	10 ~

※1 撮像素子が 1/2.5 型、被写体距離が 10 cm の場合

最小検出サイズは 1/2.5 型 / 1/3 型を使用した場合

4. 実験結果

表 3 に示すように 1 枚目のアンテナでは 9.5 GHz 時のみで放電が確認され、2 枚目のアンテナでは 9.65 GHz 時のみで放電が確認された。また、実験回数を増すごとに放電閾値が上がることを確認し

た。各パネルで数回の放電試験を行い、MTV カメラによって放電が確認されたが、放電位置の変化は見られなかった。また、スロット部を拡大した観測により、放電がアンテナ内部で起こっていることを確認した。

表3 実験ごとの放電閾値

	放電閾値 [W]		
	1回目	2回目	3回目
1枚目	533 [9.5 GHz]	777 [9.5 GHz]	放電なし
2枚目	349 [9.65 GHz]	370 [9.65 GHz]	

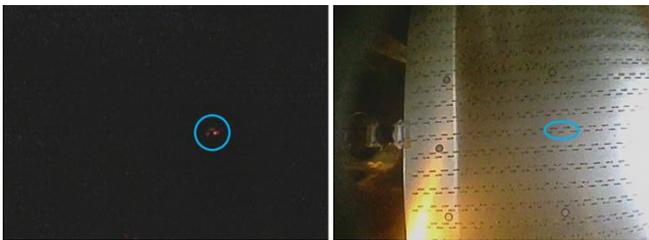


図8 MTVカメラで放電を確認

9.65 GHz, 入力電力 560 W 時、右は LED 照明点灯時

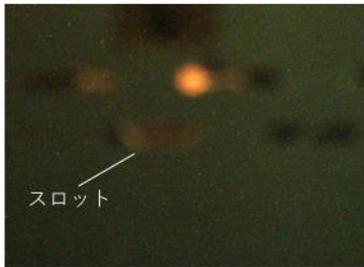


図9 広角レンズで放電を観察

9.65 GHz, 入力電力 738 W 時



図10 接着剤シートで確認された気泡

5. 考察と結論

本実験で確認された放電現象を電磁界シミュレーションソフトと放電閾値解析ソフトを用い、放電閾値の解析的評価を行った。これらの結果から、①電磁界強度分布には周波数依存性があること、②下部接着剤シートでピーク電界強度が最も高かったこと、③マルチパクタ放電はカップリングスロットや上部アンテナパネル-ハニカム構造間で

閾値が低くなること、④マルチパクタ放電は本実験での入力電力よりも2桁以上高い閾値であること、⑤100～4000 Paの条件では1 kW以下の入力電力でコロナ放電が起こる可能性があることが分かった。

もし真空度の低下が発生したとすれば、実際に気中放電が起こる可能性がある。光学レンズでの観察により放電発生部がアンテナ内部であることを突き止めた。そこでアンテナ内部を詳細に観察した結果、下部接着剤シートに気泡(図10)が確認できた。これが気体の供給源となり、気中放電を引き起こしている可能性が高い。また、本実験では次第に放電閾値が上がっていた。これは、放電実験を重ねるごとに放出される気体の量が少なくなり、放電が起きにくくなったと推定できる。そのため、アンテナ作成工程の見直しを提言した。

今後は、微小真空計を用いて局所的に真空度を測定する必要がある。さらにより感度の高いCMOSカメラを用いることによって、より鮮明な放電の様子を撮影し、更なる放電メカニズム解明に向けて研究を行いたい。また、宇宙環境を模擬したスペースチャンバを用いてプラズマ環境等を変化させ、放電発生条件やその様子を確認する予定である。

6. 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].
- [4] H.C.Koons, J.E.Mazur, R.S.Selesnick, J.B.Blake, J.F.Fennell, J.L.Roeder, P.C.Anderson, “Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference,” Air Force Research Laboratory, 1998.