

# Microwave Power and Information Transmission Experiments from an Airship and a Study on Magnetron-Based Microwave Transmitting System Weight\*

Tomohiko Mitani<sup>(1)</sup>, Teruo Fujiwara<sup>(2)</sup>, Kenji Nagano<sup>(3)</sup>, Hideki Ueda<sup>(4)</sup>, Fumito Takahashi<sup>(1)</sup>,  
Hideaki Yonekura<sup>(1)</sup>, Takahiro Hirano<sup>(1)</sup>, Hiroshi Yamakawa<sup>(1)</sup>, Naoki Shinohara<sup>(1)</sup>,  
Kozo Hashimoto<sup>(1)</sup>, Shigeo Kawasaki<sup>(1,5)</sup>, and Makoto Ando<sup>(4)</sup>

(1) Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, mitani@rish.kyoto-u.ac.jp

(2) Sho Engineering Corp., (3) Space Technology Corp., (4) Tokyo Institute of Technology,

(5) Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

## Abstract

“Microwave Power and Information Transmission Experiments from an Airship” (abbreviated as “Airship Experiments”) was conducted on the Uji campus ground in Kyoto University on March 5th and 10th, 2009. The objectives of the Airship Experiments were to demonstrate simultaneous wireless transmission of electrical power and information, to reduce the microwave transmitting system size and weight, and to remote-control the microwave transmitting system. Configuration of the Airship Experiments was transmitting system, retro-directive system, remote control and telemetry system, and receiving system. The transmitting system consisted of lithium-ion battery, power supply, two magnetrons, waveguide couplers, two-element radial line slotted antennas. Microwave power of 220 W was radiated from the transmitting system, whose weight was 42.9 kg. The Airship Experiments were successful with regard to demonstration of wireless power transmission, direction-of-arrival detection received by a pilot signal, remote control by low-power radio communication.

The weight/power ratio of the Airship Experiments was 195g/W. In order to accomplish 2g/W of weight/power ratio, which is one of the technical goals for the SPS transmitting system, considerable breakthroughs will be indispensable to the transmitting system weight.

In the present paper, the Airship Experiments were described and the magnetron-based microwave transmitting system weight was discussed, based on the Airship Experiments.

---

\* Presented at the Twelfth SPS Symposium, 13-14 November, 2009

# 飛行船実験を通じたマグネトロン送電システムの重量に関する一考察<sup>注1</sup>

三谷 友彦<sup>(1)</sup>, 藤原暉雄<sup>(2)</sup>, 長野賢司<sup>(3)</sup>, 上田英樹<sup>(4)</sup>, 高橋文人<sup>(1)</sup>, 米倉秀明<sup>(1)</sup>, 平野敬寛<sup>(1)</sup>,  
山川宏<sup>(1)</sup>, 篠原真毅<sup>(1)</sup>, 橋本弘藏<sup>(1)</sup>, 川崎繁男<sup>(1,5)</sup>, 安藤真<sup>(4)</sup>

(1) 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 mitani@rish.kyoto-u.ac.jp

(2) 翔エンジニアリング, (3) スペーステクノロジー, (4) 東京工業大学,

(5) 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

要旨：2009年3月5日および10日に京都大学にて「飛行船からのマイクロ波による電力と情報の同時伝送実験（飛行船実験）」を実施した。飛行船実験の目的は、無線電力と情報の同時伝送技術の確立、送電システムの小型・軽量化の実施、遠隔操作技術の検証であった。飛行船実験は、蓄電池、駆動電源、マグネトロン、導波管系、ラジアルラインスロットアンテナから構成される2素子の送電システム、ならびに受電システム、レトロディレクティブシステム、計測テレメータ操作系で構成され、42.9kgの搭載重量で220Wのマイクロ波出力が得られた。本稿では、飛行船実験の概要説明とともに、飛行船実験を通じたマグネトロン送電システムの重量に関する考察を述べる。

## 1. はじめに

マイクロ波 SPS の実現に向けて、効率向上あるいは低コスト化と並んで非常に重要な送電システムの課題が軽量化である。これらの課題に対して、マイクロ波送電システムのマイクロ波源候補として考えられるものは、半導体増幅器・発振器、マグネトロン、進行波管等である。様々な文献をもとにしたマイクロ波 SPS 送電システムの目標値ならびに評価項目に対する各々のマイクロ波源候補の比較表を表1に示す。現在の SPS 送電システムでは将来性の高い半導体増幅器・発振器をマイクロ波源に用いたシステムが数多く検討されている。しかしながら、現在の半導体増幅器の直流・マイクロ波（DC-RF）変換効率を鑑みると、現状でも75%以上のDC-RF変換効率を有するマグネトロンも SPS 試験衛星等に対する十分なマイクロ波源候補である。ただし、マグネトロンを SPS に利用するには宇宙での信頼性と共に送電システムの軽量化が重要な技術課題である。

表1 SPS 送電システムのマイクロ波源候補の比較

項目	半導体	マグネトロン	進行波管
DC-RF 変換効率(目標値：75%以上)	72.7%PAE@1.9GHz <sup>[2]</sup> 68.7%PAE@5.7GHz <sup>[3]</sup>	75%以上@2.45GHz 帯 約 60%@5.8GHz 帯 <sup>[4]</sup>	65%@Ku 帯 <sup>[5]</sup>
出力重量比(目標値：2g/W以下)	軽量のもので7g/W <sup>[1]</sup>	電源込みで25g/W <sup>[6]</sup>	5.7g/W@Ku 帯 <sup>[5]</sup>
低コスト化(目標値：300円/W以下)	○(将来性あり)	電子レンジ電源で良いなら◎, 直流平滑電源なら△	×
開発ニーズ <sup>[1]</sup>	◎(将来性大)	×(市場規模：小)	×(市場規模：小)
送電システム厚 <sup>[1]</sup>	10mm 級の可能性あり	100mm 級	100mm 級
高電圧送電(10kV級)との親和性 <sup>[1]</sup>	△(100V 級~10V 級駆動)	○(kV 級駆動)	○~△
宇宙での信頼性	○(実績あり)	×(実績ほとんどなし)	◎(実績大)

注1 第12回 SPS シンポジウム, 京都大学にて2009年11月13, 14日開催

これらの背景を踏まえ、マイクロ波送電システムの小型・軽量化を目的の一つとした「飛行船からのマイクロ波による電力と情報の同時伝送実験（以下、飛行船実験）」が我々の研究グループにより実施された。飛行船実験とは、飛行船にマイクロ波送電システムを搭載し、地上に放射されたマイクロ波電力をレクテナで受電・整流することにより LED の点灯、電子ブザーの起動、携帯電話充電 LED ランプの点灯等のデモを行った実験であり、世界初の飛行船から地上へのマイクロ波送電実験である。飛行船実験においては飛行船に搭載可能な重量に制限があるためにマイクロ波送電システムの小型化・軽量化を実施したが、システムの小型化・軽量化は SPS 送電システムにも転用できる技術開発である。そこで本稿では飛行船実験の概要を述べるとともに、飛行船実験を通じたマグネトロン送電システムの軽量化に関する考察について述べる。

## 2. 飛行船実験

飛行船実験の目的は、無線電力と情報の同時伝送技術の確立、送電システムの小型・軽量化の実施、遠隔操作技術の検証であり、将来的な用途として災害時における非常用無線電力供給システムとしての利用を想定している。

### 2. 1. 構成

飛行船実験におけるマイクロ波送受電システムは、送電システム、受電システム、レトロディレクティブシステム、計測テレメータ操作系により構成される。

飛行船に搭載した送電システムの写真を図 1 に示す。送電アンテナは 2 素子のラジアルラインスロットアンテナ（以下、RLSA）で構成され、各々の RSMA には導波管を経由して 2.45GHz 帯民生用マグネトロンが搭載された。マグネトロンは 48V 系リチウムイオン電池を電源とし、高電圧電源（DC-DC コンバータ）により駆動された。アンテナからのマイクロ波送電電力は各アンテナ素子から約 110W、合計約 220W であった。民生用マグネトロンの本来の定格出力は 900W であるが、900W 出力のままでは電池容量の問題で実験時間が極めて短くなること、DC-DC コンバータの重量増を招くこと、電波防護指針である  $1\text{mW}/\text{cm}^2$  以下の電力密度を地上で満たすためには飛行船高度を高くする必要があること等が問題となった。よって、マグネトロンに搭載されている永久磁石の磁場を予め弱めたものを用いることでマグネトロン駆動電圧を約 2.2kV 程度まで低減させ、上記問題点の解決を図った。本実験での送電周波数は 2.46GHz とした。マグネトロンの発振周波数を 2.46GHz に固定するために各マグネトロンには電流制御器が取り付けられた。2.46GHz の基準信号出力とマグネトロン出力の位相差を検知して電流制御器を調整することによる位相同期ループにより、基準信号に対するマグネトロンの周波数同

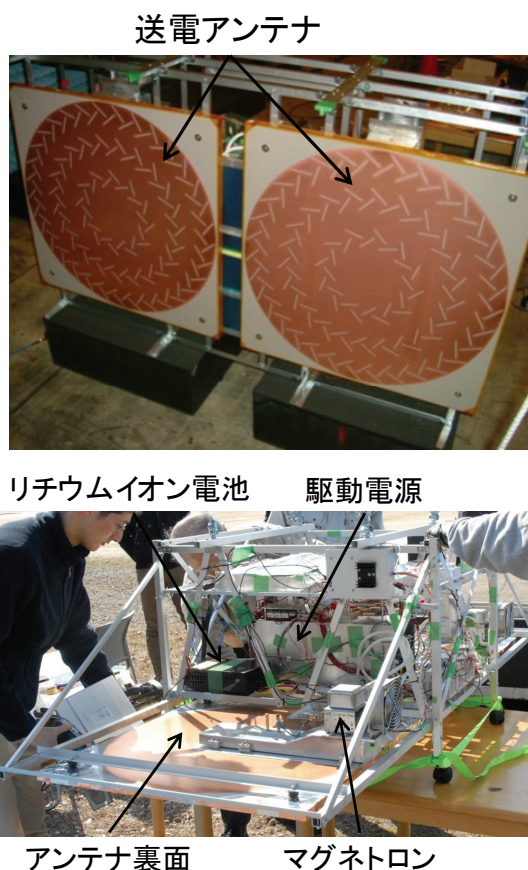


図 1 飛行船実験送電システムの写真

期・位相同期を実現した。マグネトロン位相制御については、基準信号側に移相器を取り付け、移相器の位相を制御することでマグネトロン出力の位相が制御される。これにより2素子のフェーズドアレーアンテナとしての機能を持たせることができた。

受電システムはレクテナを用意し、無線電力伝送デモを行った。

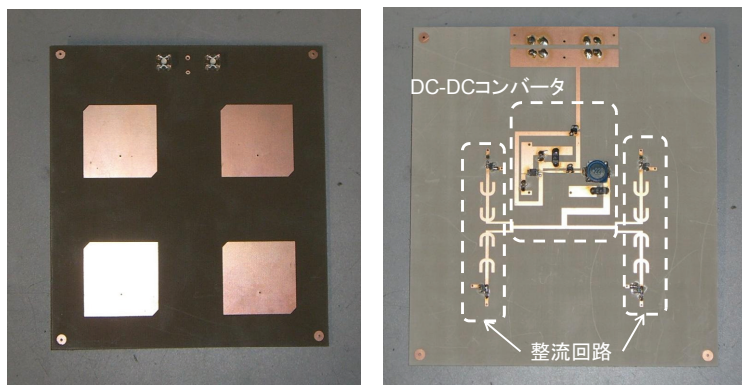


図2 飛行船実験用レクテナ (LED) の写真

図2にLEDが搭載された4素子(2素子×2素子)レクテナの写真を示す。レクテナ4素子を直流部で合成し、DC-DCコンバータを介して直流電圧5Vを出力しLEDが点灯する仕組みとなっている。このLED点灯レクテナの他に4素子(2素子×2素子)の電子ブザー駆動レクテナ、12素子(4素子×3素子)の携帯電話充電ランプ点灯用レクテナを用いてデモ実験を行った。

レトロディレクティブシステムは、地上から5.8GHzのパイロット信号を送信し、それを飛行船に搭載されたパイロット信号受信アンテナで受信して到来方向を計算機により推定した。また計測テレメータ操作系は、チャンネル周波数2.412GHzの無線LANを利用し、バックアップとして429MHz帯の特定小電力無線によるデータ伝送系を利用した。

## 2. 2. デモ実験結果

飛行船実験は2009年3月5日、および10日に京都大学宇治総合グラウンドにて実施された。図3に飛行船実験の様子を示す。

飛行船は長さ17m、最大直径4mである。通常はエンジンを搭載した飛行が可能な飛行船であるが、今回の実験では送電システムの搭載重量が大きいこと、また最小旋回半径がグラウンドの敷地を越えてしまう等の問題から、飛行船にはエンジンを搭載しなかった。したがって、ロープを使って飛行船を高度約30mの位置に係留させて実験を行った。

マイクロ波送電受電デモ実験については、上空でマイクロ波送電システム起動後にレクテナによるLED点灯、電子ブザー起動、携帯電話充電ランプ点灯を確認し、実験に成功した。

レトロディレクティブシステムは、到来方向測定システムが問題なく動作していることを確認できた。ただし、飛行船は様々な方向に揺れたため、到来方向が大きく変化した。このため、地上での送電アンテナのパタンの測定はピークの位置の決定もできなかった。計測テレメータ操作系は、無線LANによる通信はマイクロ波送電後には困難となったが、バックアップの小電力



図3 飛行船実験の様子

無線を使用したコマンド操作等は問題なく動作した。

以上より、世界で初めて飛行船から地上に向けてマイクロ波による無線電力伝送実験に成功した。一方で、飛行船が様々な方向に揺れる等の飛行船特有の問題点も出たため、非常用無線電力供給システムとしての利用を目指すには今後の改良が必要であろう。

### 3. 飛行船実験を通じたマグネトロン送電システムの一考察

表 1 に飛行船実験における送電システムの重量・マイクロ波出力、および SPS を想定したときの重量・マイクロ波出力予測表を示す。陽極電流値と DC-RF 変換効率の関係を示す。

表 2 飛行船実験送電システム重量・マイクロ波出力  
および SPS を想定したときの重量・マイクロ波出力予測

	飛行船実験	SPS での想定
電源	9.1kg (蓄電池)	— (太陽電池の重量に加算)
構造系	8.5kg	— (構造系の重量に加算)
マグネトロン電源系	11.8kg (2 系統)	$5.9\text{kg} + \alpha$ (1 素子分。マグネトロンの出力増による電源重量増あり)
送電アンテナ	8.2kg (2 素子)	4.1kg (1 素子分)
レトロディレクティブシステム	2.7kg	— (大規模化による重量増への寄与は十分小さい)
計測テレメータ操作系	2.6kg	— (大規模化による重量増への寄与は十分小さい)
熱制御系 (冷却系)	— (空冷ファンの重量はマグネトロン電源系に含む)	$\beta$ (この重量寄与が重要な問題)
重量合計	42.9kg	$9\text{kg} + \alpha + \beta$
マイクロ波出力	220W (2 素子)	1kW (1 素子)
出力重量比	195g/W	$\{9 + (\alpha + \beta)/1000\}$ g/W

飛行船実験送電システムの総重量は 42.9kg であり、そのときのマイクロ波総出力は 220W であったため、飛行船実験における出力重量比は 195g/W と計算される。SPS 出力重量比の目標値は 2g/W 以下であるため、飛行船実験送電システムの出力重量比は 2 桁大きい値となった。出力重量比増の大きな要因は、飛行船の搭載重量制限のためにマグネトロンの陽極電圧を定格値の 4.1kV から 2.2kV まで下げたことである。この結果、マグネトロンからのマイクロ波出力が大幅に低下したとともに、永久磁石の磁場を下げたことにより DC-RF 変換効率が 40%程度まで低下し、相対的に出力重量比が大きくなったと考えられる。

SPS を想定したときには、原則としてマグネトロンは DC-RF 変換効率が最大となるような条件で駆動されると考えられるため、マグネトロン本来の能力である DC-RF 変換効率 70%以上、マイクロ波出力 1kW 程度が期待される。また SPS の場合、太陽電池および構造系の重量は送電システム重量に含まれない。一方で、マグネトロン電源系に関しては、マグネトロン出力増に伴う電源重量増が想定される。また、最も重要な問題と考えられる熱制御系の重量が定かではない。特にマグネトロンを高効率動作させるにはマグネトロンの永久磁石冷却が重要である<sup>[8]</sup>ため、永

久磁石冷却を含めたマグネトロン冷却のための重量がどの程度になるかを見積もることは極めて重要な課題である。ただし、これらの重量増分を除いたとしても現時点のマグネトロン送電システムの重量は 9g/W となるため、出力重量比 2g/W を実現するためにはマグネトロン送電システムの抜本的な軽量化を検討する必要がある。例えば、太陽電池からの高電圧直接駆動によりマグネトロン駆動電源の軽量化や駆動電源排除の可能性、送電アンテナ自身を構造系と兼ねることによる軽量化の可能性等、相当なブレークスルーを目指した研究開発を実施する必要がある。

#### 4. おわりに

本稿では、飛行船実験の概要を紹介し、飛行船実験を通じたマグネトロン送電システムの重量に関する議論を行った。本稿で示した送電システム重量考察はマグネトロンだけでなく半導体素子による送電システムにも適用可能である。この場合も、駆動電源と送電アンテナの重量は極めて重要であると予想される。したがって、本稿で示した問題提起はマイクロ波送電システムの共通課題として認識し、太陽電池から、マイクロ波発生、位相制御、アンテナ、構造までを総合的に考慮した送電システムの軽量化が SPS 実現に向けた最重要課題の一つとなるであろう。

#### 謝辞

飛行船実験は科研費基盤研究 B (18360171、研究代表者：橋本)、財団法人国際コミュニケーション基金 (以下、研究代表者：山川)、科学技術振興機構 (JST) 地域イノベーション創出総合支援事業重点地域研究開発推進プログラム平成 19 年度シーズ発掘試験、京都大学総長裁量経費等の助成等を受けて行われた。また飛行船の運用等にご尽力頂いた株式会社メイクスの池山氏および関係各位、実験補助等に携わった京都大学生存圏研究所の教職員各位に深く感謝する。

#### 参考文献

- [1] JAXA 高度ミッション研究グループ, “宇宙太陽光利用システム総合研究便覧”, 2009
- [2] 高田 賢治, 津田 邦男, 石川 亮, 本城 和彦, 久田 安正, “SSPS 用 GaN 半導体デバイスの試作結果”, 第 17 回宇宙太陽発電時限研究専門委員会研究会, 信学技報 SPS2007-3, Apr. 2007
- [3] 石川 亮, 黒田 健太, 本城 和彦, 津田 邦男, 久田 安正, “GaNHEMT を用いた SSPS 用 5.8GHz 帯 F 級高効率増幅器”, 第 22 回宇宙太陽発電時限研究専門委員会研究会, 信学技報 SPS2008-4, July 2007
- [4] 福谷 景, 三谷 友彦, 篠原 真毅, 松本 紘, “5.8GHz 帯マグネトロンの基礎特性評価”, 第 8 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム, 講演要旨集 pp.74-79, Sep. 2005
- [5] 片山 勘次, “衛星搭載用 TWTA における性能向上と開発動向”, 第 4 回宇宙太陽発電時限研究専門委員会研究会, 信学技報 SPS2003-3, Feb. 2004
- [6] 篠原 真毅, 三谷 友彦, 篠原 真毅, 松本 紘, “5.8GHz 帯マグネトロンの基礎特性評価”, 第 8 回 SPS シンポジウム, 講演要旨集 pp.74-79, 2005
- [7] 篠原 真毅, 松本 紘, 藤原 栄一郎, 高橋 吉郎, 田中 直治, 佐藤 勝之, “軽量小型マグネトロンマイクロ波送電器 COMET”, 第 6 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム, 講演要旨集 pp.75-80, Oct. 2003
- [8] 川崎 春夫, 三谷 友彦, 篠原 真毅, 松本 紘, “マグネトロンの温度環境による性能変化 T”, 電子情報通信学会論文誌・和文 C, Vol.J90, No.5, pp.428-436, May 2007