

# Fundamental Experiment by the Breadboard Model Aiming at the Proving Experiment with the SPS Small Satellite<sup>\*</sup>

Masashi TAKAHASHI<sup>1</sup>, Fumiya INOUE<sup>1</sup>, Ken-ichiro MAKI<sup>2</sup>,  
Kousuke KAWAHARA<sup>2</sup>, Koji TANAKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tokyo University of Science 6-3-1, Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

<sup>2</sup> ISAS/JAXA 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210 Japan

## Abstract

We are developing a breadboard model of a wireless power transmission (WPT) experiment for a small scientific satellite toward a solar power satellite (SPS). The transmission experiment from a small scientific satellite to the ground is included as one of the early milestones in the roadmap toward the realization of the practical SPS. The purposes of the SPS small satellite experiments are to establish a precise directional control method from the orbit to the ground and to clarify the effect of the plasma in ionosphere on microwaves. The model is used to evaluate the microwave circuit and phased-array antenna for the onboard instrument. We carried out the fundamental experiment for the loss evaluation of the transmission microwave power by the small satellite. This report presents the stability of the output power of the SPS transmission system.

---

<sup>\*</sup> Presented at the Sixth SPS Symposium, 3-4 October, 2013

# SPS 小型衛星における実証実験を目指した ブレッドボードモデルによる基礎実験

高橋 将司\*1、井上史也\*1、牧 謙一郎\*2、川原 康介\*2、田中 孝治\*2  
東京理科大学大学院\*1  
JAXA/ISAS

## 1. 研究背景

我々は、SPS の実用的なシステムの完成と運用を最終目標にし、SPS の要素技術開発として小型衛星を用いた宇宙-地上間マイクロ波ビーム制御能力、プラズマと大電力マイクロ波との相互作用の検証実験を行うことを検討している。

現在、その準備段階として小型衛星に搭載する送電システムに関するブレッドボードモデルを開発しており、これを利用した地上/低高度における基礎実験、また衛星搭載用の熱構造評価を行う予定である。[1]

図 1 に SPS 小型衛星での実験の概念図を示す。小型衛星での実験の評価項目として送電マイクロ波の損失がある。衛星から放射されたマイクロ波は電離層プラズマを透過して地上の受電基地局で観測するが、その時は数%のオーダーで送電電力の損失を評価したいと考えている。そのためには、衛星からの出力を%以下の精度で管理する必要がある。また送電ビームパターンの形状についても評価するため、ビーム形成に影響を及ぼす各素子の位相誤差を抑える必要がある。目標値としては小型衛星の送電システムに組み込まれる 5bit デジタル移相器の量子化誤差の範囲に収まるように  $10^\circ$  以下で位相を制御したいと考えている。

## 2. 研究目的

図 2 に小型衛星で想定している実験シーケンスの図を表す。小型衛星の軌道は高度 370km の準回帰軌道で、衛星と地上の基地局の位置によって送電システムの状態を切り替えていくことになる。このような実験シーケンスを検討しているなかで、小型衛星からの送電出力が変動する要因として、回路のマイクロ波素子の温度変化、送電システムの電源 ON/OFF の切り替えと低出力/高出力放射モードの切り替えが考えられる。このうちブレッドボードモデルに実装されているパワーアンプの温度特性は得ており、温度変化とともに連続的な出力の変化が生じることがわかっている。

そこで本研究の目的は、送電システムの出力の振幅・位相の再現性を検証することである。

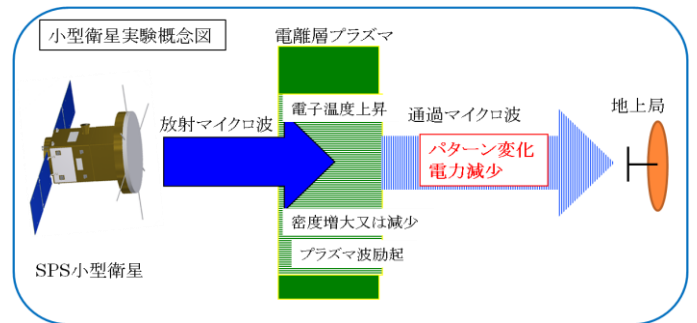


図 1 小型衛星実験概要図

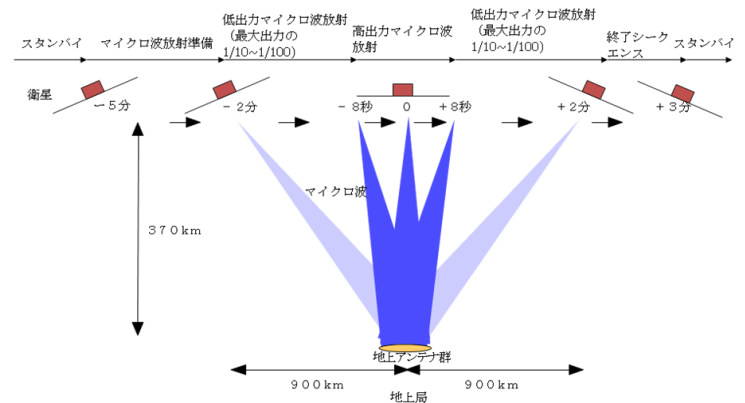


図 2 小型衛星実験 シークエンス

## 3. ブレッドボードモデルの概要

本研究で製作を進めているブレッドボードモデルの設計仕様を表 1 に示す。本モデルでは、実用システムにおける展開方式による衛星の大面積化を想定して、階層構造を有する薄型パネル状に製作する。第 1 層である送電アンテナは、縦 16×横 16 個の計 256 アンテナ素子を 2 次元に配列する。これらからアレーアンテナ全体の寸法は  $0.63 \times 0.63\text{m}$  である。アレーアンテナの下方の第 2 層には、マイクロ波発振器、増幅部、移相器を同一平面に実装する。増幅回路及び移相器は商用のマイクロ波集積回路 (MMIC) を採用し、システムの小型化、低コスト化を図っている。単一の発振器から 2 分配を繰り返し、複数の前置増幅器を介しながら最終的に 64 分配しその後段にそれぞれ 6 ビットデジタル移相器、電力増幅器の順に接続し、それぞれ約 2.5W を上層のアンテナに給電する。この時、総出力電力は約 160W となる。

第3層には、放熱構造を設けた。回路層特に電力増幅素子の裏面は直接放熱層に密着させ、放熱特性の向上を図っている。地上実験では、放熱フィンと冷却装置からの送風により、連続運転を可能としている。

各層の厚さは、第1層アンテナ部は0.8mm厚の基板に電波吸収シートを貼り付け、第2層マイクロ波回路部は、0.4mmの回路基板を3mmのアルミ板に貼り付け、総厚3.4mmとなっている。搭載用システムは、第1層、第2層に第3層の放熱機構と合わせて、パネル厚さを5cm以内に設計する方針である。図3に3層構造のブレッドボードモデルの1部分を示す。

第1表 原稿全体の書式

寸法	幅 0.63m × 奥行 0.63 (放熱機構を除く)、厚さ 5cm 以内
送電出力	160W
マイクロ波ビーム	フェーズドアレー
走査方式	(マイクロストリップアンテナ)
ビーム制御方式	レトロディレクティブ
アンテナ素子数	縦 16 × 横 16 = 256 素子 (2 × 2 のサブアレーを縦 8 × 横 8)
送電周波数帯	5GHz 帯



図3 ブレッドボードモデル構造

#### 4. 増幅器の温度特性

図4, 図5はブレッドボードモデルに実装されているGaAsのパワーアンプの温度と1マイクロ波回路(1モジュール)の各出力の振幅と移相量の関係である。各出力で温度係数にバラつきが存在し、利得はアンプ温度が50°Cを越えたあたりから著しい変化が起こる。位相は1°C毎に0.4~1.2°程度変化してしまうことがわかった。

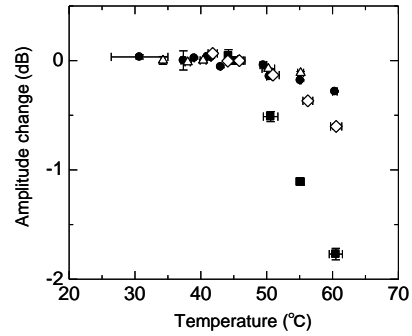


図4 GaAs アンプ振幅 温度依存性

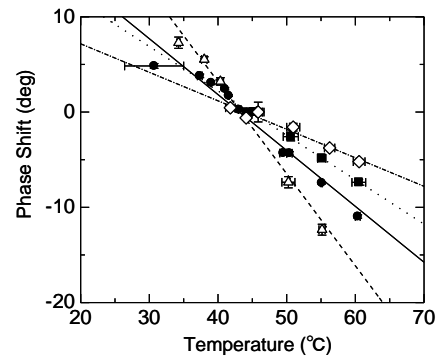


図5 GaAS アンプ位相 温度依存性

#### 5. 実験

実験目的で述べたマイクロ波回路の出力の再現性を検証するために、ブレッドボードモデルのマイクロ波回路を用いて実験を行った。実験の外観図を図6に示す。実験は真空環境下で行い、パワーアンプの温度をモニタしながらネットワークアナライザを用いて回路の出力の振幅・位相を計測する。送電システムのON/OFF、高出力/低出力の切り替え操作は電源電圧とネットワークアナライザからの入力パワーを調節することで行う。

また、マイクロ波回路を設置している真空チャンバ内の底面を水冷チラーによって冷却し、アンプの温度を制御する。

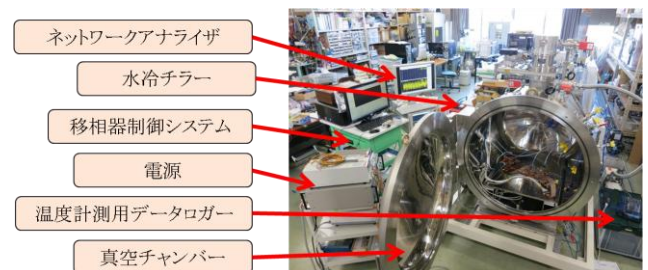


図6 ブレッドボードモデル構造

## 6. 実験結果

### 6.1 ON/OFF 切り替え

送電システムの ON/OFF の切り替え操作によるアンブ温度と振幅、アンブ温度と位相の関係をそれぞれ図 7、図 8 に示す。送電システムを ON にしてから 5 分または 6 分で OFF へ切り替え、その 1 分後にまたシステムを ON に切り替えるという操作を繰り返し、そのときのアンブ温度・回路の出力振幅・位相を測定した。

振幅・位相ともに温度との相関性が得られており、温度が 5℃変化すると振幅が約 11%、位相が 2° 変化する。ただし、ON/OFF 操作を繰り返しても温度が一定ならば同程度の値となった。例えばアンブの温度が 37℃のとき、振幅は約 0.2%、位相は約 0.6° の誤差であり、再現性を得られていることがわかった。

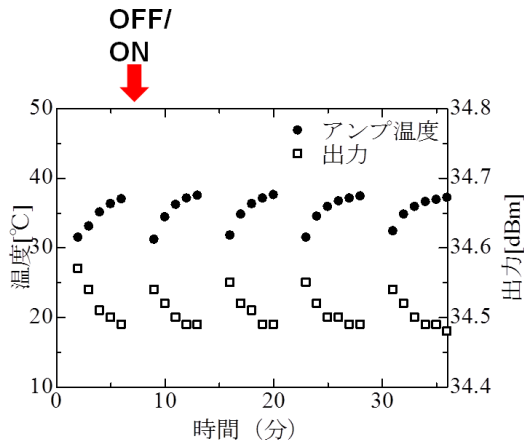


図 7 ON/OFF 試験 振幅

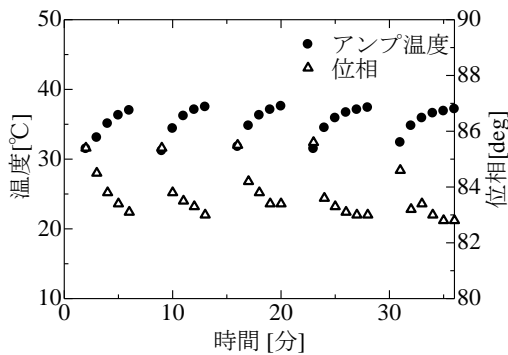


図 8 ON/OFF 試験 振幅

### 6.2 高出力/低出力モード切り替え

低出力モードへの切り替えは、ネットワークアナライザの入力パワーを調整する方法とパワーアンプへ供給するドレイン電圧を調整する方法の二通りの操作で行った。低出力モードの振幅は高出力モードの振幅の 1/10 とした。

図 9、図 10 に入力パワーを調整して放射モードの切り替

えを行った方法におけるアンブ温度と振幅、アンブ温度と位相の関係を示した。低出力モードから測定を開始し、5 分毎に放射モードの切り替えを行い、チラーの冷却の影響で温度を徐々に低下させながらの測定になった。モードの切り替えの直前と直後の温度の差が少ない点で値を比較すると、振幅誤差は高出力・低出力モードでそれぞれ 0.2%、4.7%、位相誤差はそれぞれ 1.6°、3.0° となった。

図 11、図 12 にパワーアンプへ供給するドレイン電圧を調整する方法におけるアンブ温度と振幅、アンブ温度と位相の関係を示した。放射モード切り替えは、5 分から 6 分間隔で行った。アンプへの供給電圧はアンプの発熱量に大きく関わるため、測定中の温度変化は大きくなった。また、位相の結果に関して、ある温度になると数度位相がジャンプするという現象が見られた。モード切り替え直前の温度が安定した点で値を比較すると、振幅誤差は高出力・低出力モードでそれぞれ 0.2%、0.7%、位相誤差はともに 0.3° となった。

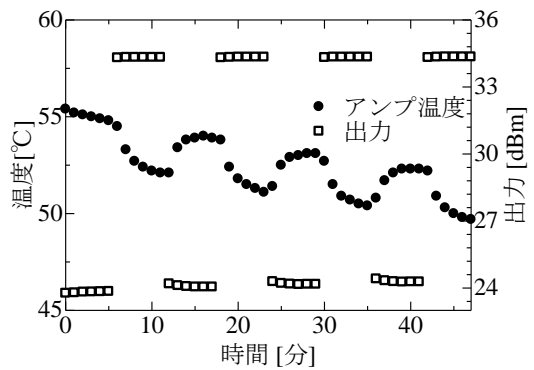


図 9 入力操作による高出力/低出力試験 振幅

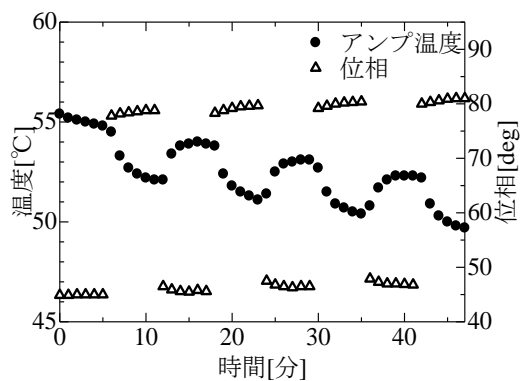


図 10 入力調整による高出力/低出力試験 位相

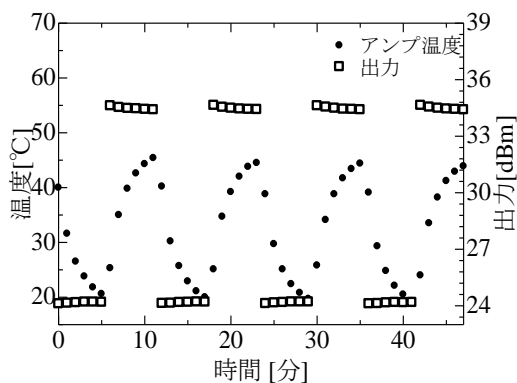


図 11 電圧調整による高出力/低出力試験 振幅

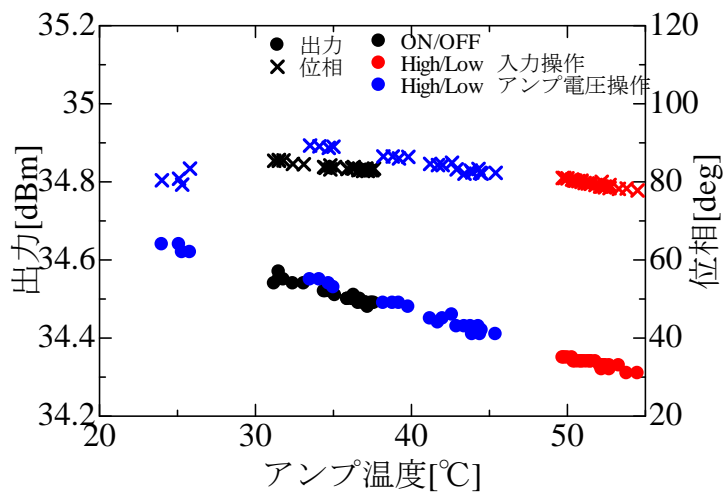


図 13 アンプ出力温度特性

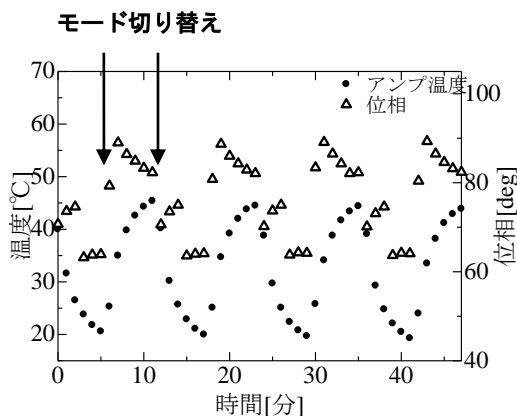


図 12 電圧調整による高出力/低出力試験 位相

## 7. 考察

今回の行った全ての振幅・位相の測定結果を温度特性としてまとめたものを図 13 に示す。結果を見ると、送電システムのモードに切り替えに関わらず温度特性が良く一致していることがわかり、例えば  $4^{\circ}\text{C}$  以下で素子の温度を制御できれば振幅を 1% 以下、位相を  $10^{\circ}$  以下で変動要因を目標値以内に抑えて管理できるという結果が得られた。

また、ある温度で出力の位相がジャンプするという現象については、ブレッドボードモデルに実装しているパワーアンプ固有の現象だと考えており、それを確認するための試験を現在検討中である。

## 8. まとめ

現在 SPS の小型衛星での軌道上実験を計画しており、その前段階として SPS のブレッドボードモデルを用いて各種基礎実験を行っている。小型衛星実験では伝搬路の影響を評価するため、損失とビーム形状の変化を正確に測定する必要がある。そのためには送電側の放射電力・位相を正確に制御する必要がある。

放射電力と位相の変動要因として考えられる送電システムの ON/OFF と高出力/低出力モードの切り替えをブレッドボードモデルを用いて実験的に検証した。その結果、パワーアンプの温度をモニタすることで変化の主要要因を抑え、目標の精度である放射電力を 1% 以下、位相誤差を  $10^{\circ}$  以下で制御可能だとわかった。この結果を用いれば小型科学衛星で提案しようとしている実験のためのオンボード機器の開発が可能であることを確認した。

## 参考文献

- 1) 高橋、田中、牧、川原、佐々木、“SPS 小型衛星用ブレッドボードモデルを用いた ソフトウェアレトロディレクティブ方式によるマイクロ波ビーム制御に関する基礎実験”、電子情報通信学会信学技報 WPT2012-08 (2012-05)、pp. 37-40 (2012)。