

# 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

高橋 将司<sup>†</sup> 田中 孝治<sup>‡</sup> 牧 謙一郎<sup>‡</sup> 川原 康介<sup>‡</sup> 佐々木 進<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 東京理科大学大学院理学研究科 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

<sup>‡</sup> 宇宙航空研究開発機構 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

E-mail: <sup>†</sup> m-takahashi@ac.jaxa.jp

**あらまし** 我々は、小型衛星を用いたマイクロ波無線送電実験のためのブレッドボードモデルの開発を行っている。ブレッドボードモデルでは、LバンドあるいはSバンドのパイロット信号を用い、5GHz帯マイクロ波ビームの方向制御を計画している。今回は、1GHzのパイロット信号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ビーム方向制御実験を行なった。特に、複数のパイロット受信システムを含む送電パネルから構成される送電システムのビーム制御に関する基礎実験結果を報告する。

**キーワード** 太陽発電衛星、宇宙太陽光発電、ビーム制御、レトロディレクティブ

## Microwave Beam Steering Experiment by a Software Retro-directive Method using the Breadboard model of SPS Small Scientific Satellite

Masashi Takahashi<sup>†</sup> Koji Tanaka<sup>‡</sup> Ken-ichiro Maki<sup>‡</sup>  
Kosuke Kawahara<sup>‡</sup> and Susumu Sasaki<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science, Tokyo University of Science 1-3 Kagurazaka, Shinjuku, 162-8601 Japan

<sup>‡</sup> JAXA 252-5210 Yoshino-dai, Chuo-ku, Sagami-hara, 252-5210 Japan

E-mail: <sup>†</sup> m-takahashi@ac.jaxa.jp

**Abstract** We are developing a breadboard model of a wireless power transmission (WPT) experiment using a small scientific satellite toward a solar power satellite (SPS). The breadboard model can steer the microwave beam of the 5GHz band by the software retro-directive method using the pilot signal of the 1GHz band. We carried out the fundamental beam control experiments using the bread board model that had multiple pilot signal receiving systems. Preliminary results on the beam directional control accuracy were described.

**Keyword** Solar Power Satellite, Beam control, and Retro-directive method

### 1. 背景と目的

太陽発電衛星 (SPS) とは、衛星軌道上に建設した大規模太陽発電システムによって得られた電気エネルギーを地上に無線送電を行い利用する新しい発電システムである。従来の地上における太陽光発電と比較して、天候による影響がほとんど無く、安定した電力供給が可能である。最大の特徴は、大気による損失が極めて少ないマイクロ波を用いて軌道上から地上へ送電を行う点である[1]。我々は、将来の太陽発電衛星の実

用化を目指し、それに至るまでの段階的な技術確立目標の一つとして、小型衛星を用い、宇宙-地上間送電技術の中で最も重要な正確なビーム方向制御実験の実施を検討している[2]。本研究では、小型衛星に搭載する送電装置のブレッドボードモデルを開発し、これを用い、各種特性取得と性能評価を行なっている。

本モデルの特徴は、その薄型パネル構造にある。マイクロ波の発振から放射に至る機能を幅 60cm 奥行き 60cm のパネルに納め、その厚さを数 cm に抑える。パ

ネル片面にはフェーズドアレーアンテナを搭載し、ソフトウェアレトロディレクティブ方式を採用して、受電アンテナ方向へのビーム放射方向を自動制御する。アンテナ素子には移相器が接続されており、パイロット信号を基に、PIC（Peripheral Interface Controller）マイコンによって受電アンテナ方向を推定し、移相器を自動制御する。この制御機構もパネル内部に組み込むことで、システムの小型化、独立動作を実現する。今後、開発されたブレッドボードモデルは 100~1000m 程度の低高度-地上間送電実験や熱真空試験等により熱構造設計データの取得にも利用する予定である。本論文では、ソフトウェアレトロディレクティブ方式によるビーム制御精度に関する予備的実験結果に関して述べる。

## 2. 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の設計仕様及び各層の機能をそれぞれ表 1、表 2 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积化を想定して、階層構造を有する薄型パネル状に製作し、その厚さの目標値を 5 cm 以内に設定している。現在は、3 層構成となっており、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 次元に配列し、素子間隔を波長の 0.75 倍とした。これらからアレーアンテナ全体の寸法は 0.63×0.63m 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 2.5W を上層のアンテナに給電する。この時、総出力電力は 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。また、発熱・温度分布データから、衛星搭載用の送電パネルの熱構造設計用データの取得を行っている。

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。回路部の特性に影響を与えないように現在は、空間を 10mm 程度あけて重ねている。今後、この間隔は最適化する予定である。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 1 に 3 層構造のブレッドボードモデルの 1 部分を示す。

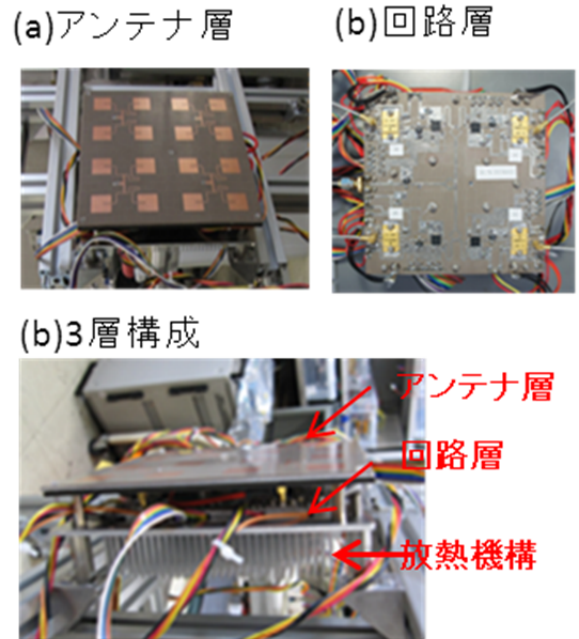


図 1 ブレッドボードモデル

表 1 送電システムの特徴

寸法	幅 0.63m×奥行 0.63 (放熱機構を除く)、厚さ 5cm 以内
送電周波数	5.7GHz
送電出力	160W
マイクロ波ビーム走査方式	フェーズドアレー (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)
偏波	右旋円偏波

表 2 各階層における機能

第 1 層	フェーズドアレーアンテナ
第 2 層	発振、増幅、移相、ビーム制御回路
第 3 層	放熱機構

## 3. 送電ビーム自動制御の原理

図 2 に本モデルで採用する送電ビーム制御装置の構成を示す。本モデルではソフトウェアレトロディレクティブ方式を採用している。パイロット信号は、受電アンテナ（レクテナ）の中心部に設置される送信アンテナから衛星に向けて放射される。衛星側に搭載される送電システムは、同一構造の送電パネルが多数連結

される機構が検討されている。パイロット信号受信アンテナは、各送電パネルにそれぞれ複数個搭載され、各パネルに搭載されたソフトウェアレトロディレクティブシステムにより、パイロット信号の到来方向の検出を行う。SPS では、複数の到来方向検出システムを組み合わせ、大きな送電アンテナから放射されるビームの正確な方向制御とビーム形成を行わなければならない。我々のブレッドボードモデルでは、2組の到来方向検出システムを搭載し、その性能評価実験を行う。

ビームの到来方向検出は、2つのパイロット信号を位相検出器に入力することで、2信号間の位相差を測定し、この情報を制御回路に入力する。制御回路では、与えられた位相差  $\Delta\varphi$  からパイロット信号の到来方向  $\theta$  が以下の式で導出される。

$$\sin \theta = \frac{\Delta\varphi}{k_p d_p} \quad (1)$$

このとき  $k_p$ ,  $d_p$  はパイロット信号のそれぞれ波数と受信アンテナ間隔である。送電アレーアンテナの各素子の放射マイクロ波が、この方向で同相となるように、各素子に位相遅延を与えるように移相器を制御する。送信アレーアンテナの素子が1次元に等間隔で計  $n$  個配列されているとき、 $i$  番目の素子に与える遅延量は、

$$\varphi_i = (i - 1)k_t d_t \sin \theta \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

である。このとき、 $k_p$  は送電マイクロ波の波数、 $d_p$  は送電アンテナ間隔である。このような制御を行うことで、衛星から見たレクテナの方向が変化しても、送電マイクロ波は常にレクテナ方向へ放射される。

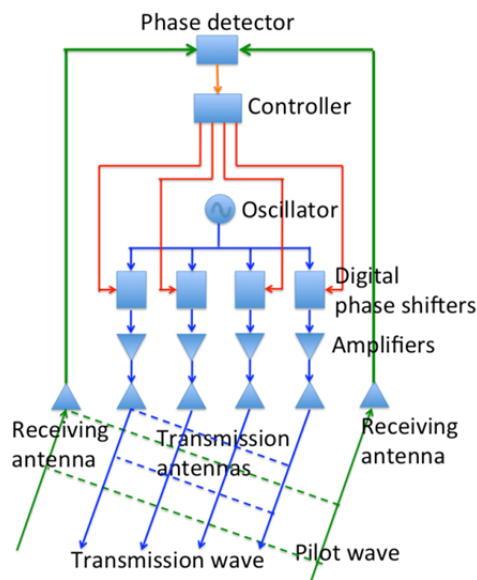


図2 ソフトウェアレトロディレクティブ方式による送電ビーム制御系の構成 (レクテナ側のパイロット信号送信系は省略)

#### 4. 移相器制御信号の測定

パイロット信号の位相検出器への入力を有線で行い、想定したパイロット信号の到来方向に応じて、位相差信号が出力されることを確認した。移相器制御システムには、移相検出器から出力される位相差に応じたアナログ信号が入力され、移相器制御のための6ビットデジタル信号が出力される。

パイロット信号の周波数帯域はLバンドとSバンドの2種類を検討しており、今回はLバンドの1GHzで実験を行った。

この実験における位相検出器、及び移相器制御の仕様を表3にまとめて示す。採用する位相検出器では、 $0 \sim \pi$  radの位相差に対応した電圧が出力され、PICマイコンを含む制御回路に入力される。測定した位相検出器の入力信号の位相差に対する出力の結果を図3に示す。このPICに搭載したプログラムでは、位相検出器から与えられる電圧を元に式(1)(2)を用いて移相量を計算し、その移相量に対応する6bitの制御信号を全ての移相器について生成、出力する。走査可能なビーム方向角度は $-5^\circ \sim 5^\circ$ で、PICマイコンからはパイロット信号到来方向に応じて出力される移相器制御信号が推移する。パイロット信号到来方向は、位相検出器への入力信号をアナログ移相器による位相調整で再現している。今回の実験では、1つの制御システムで4つの移相器を制御する。接続される移相器4個への制御信号をそれぞれSignal 1~4とし、計測結果を図4に示す。到来角度が $-1.25^\circ \sim +1.25^\circ$ 範囲のときは正面にビームが向くように制御信号が出力され、その範囲外にそれたら $2.5^\circ$ ステップで制御信号が推移する。この結果から位相検出器からの入力をPICマイコンを介した制御回路から、正確に制御信号が出力できていることを確認できた。

#### 5. 送電ビーム走査実験

次に、マイクロ波の無線送電に利用するフェーズドアレーアンテナの製作と特性評価について報告する。本ブレッドボードモデルに要求される薄型構造を実現するために、マイクロストリップアンテナを採用する。アレーの開口面積を広げ、ビームの指向性を高めるために、増幅部ポート一つにつき、 $2 \times 2$ の4素子付きサブアレーアンテナを組み合わせ、サブアレー数 $8 \times 8$ 計64個、総アンテナ数 $16 \times 16$ 計256個のアレーアンテナを構築する。単一のサブアレーに関して、電磁界解析ソフトウェアSONNETを利用して設計し、パッチや線路の構造の最適化を行った。増幅・移相部試作器に対応して製作した16素子アレーアンテナの外観を図5に示す。

図6に走査ビームの放射パターン実測結果を示す。

このときに使用したアンテナは、2×8素子に配列した場合であり、増幅器は含まない。

表3 送電ビーム制御系仕様

パイロット信号周波数	1000MHz
位相検出器	
検出位相差	0~ $\pi$ rad
入力範囲	-60~0 dBm
移相器制御	
制御信号ビット数	6
移相器数 (送信アレー素子数)	4

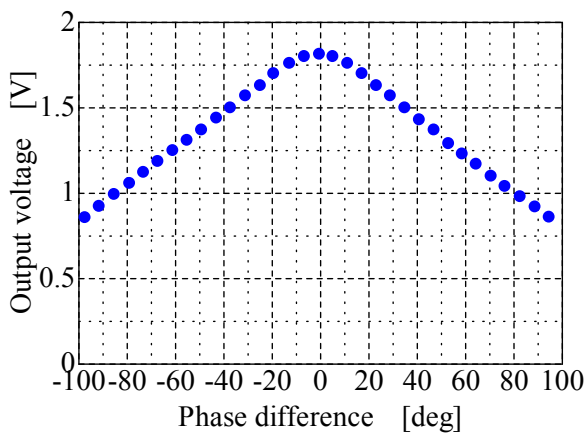


図3 位相検出器の出力

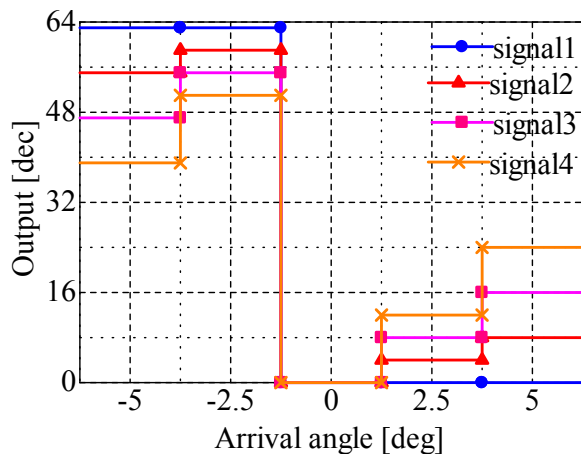


図4 PIC マイコンからの出力制御信号

デジタル移相器での移相量を実測し、その実測値を元に目標ビーム方向角度、 $-10^\circ$ 、 $-5^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $+5^\circ$ 、 $+10^\circ$ の5方向に対する各ポートの6ビットの制御信号をそれぞれ入力した。目標が正面  $0^\circ$  の際、メインローブのピークは $-2^\circ$ の方向にあり、これには初期設置

誤差によるものとする。目標値 $-10^\circ$ 、 $-5^\circ$ 、 $+5^\circ$ 、 $+10^\circ$ に対して、 $0^\circ$ を基準とした際の相対角度の実測値はそれぞれ、 $-9^\circ$ 、 $-4.5^\circ$ 、 $+5^\circ$ 、 $+9.5^\circ$ となり、誤差 $0\sim 1.0^\circ$  ( $0\sim 10\%$ )という定量的評価が得られた。

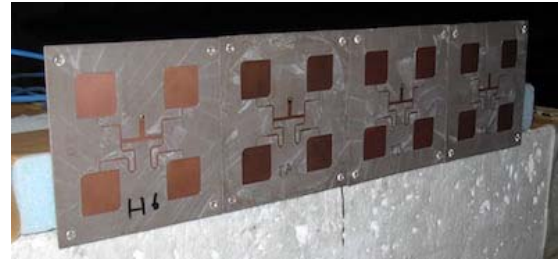


図5 製作したアレーアンテナ

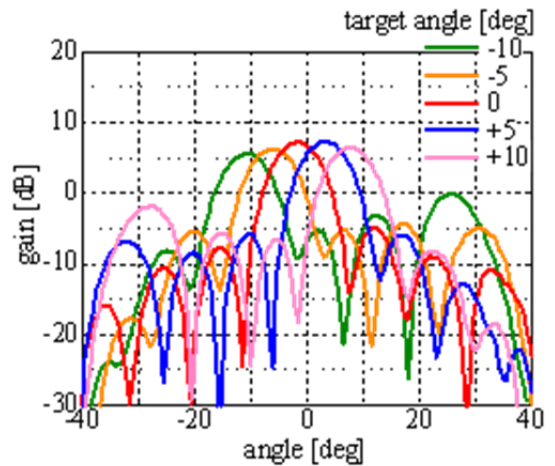


図6 走査ビームパターン実測結果

## 6. まとめ

我々は、小型衛星を利用した太陽発電衛星の軌道上実証実験を目指して、その前段階である地上・低高度送電実験を実施するためのブレッドボードモデルの開発を進めている。そのブレッドボードモデルの概念設計について説明した。またソフトウェアレトロディレクティブ方式を採用している本モデルのビーム制御装置の構成について報告し、それに用いる位相検出器と、制御回路の評価を行った。

今後は、無線送電によるビーム追尾実験を行い、また本モデルを用いての衛星搭載機器開発のための基礎実験を行っていく。

## 文 献

- [1] S. Sasaki, K. Tanaka, and AMR Group, "JAXA Activities for SSPS Research," 28th ISTS, Okinawa, 2011-q-02 (2011)
- [2] 牧謙一郎, 高橋将司, 宮代健吾, 田中孝治, 佐々木進, 川原康介, 鎌田幸男, 小紫公也, "軌道上実証試験を目指した太陽発電衛星ブレッドボードモデルの開発", 第55回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1H03, Nov. 2011.