

小型科学衛星を用いた無線送電実験のためのブレッドボードモデルの開発 I

田中 孝治[†] 牧謙 一郎[†] 高橋 将司[‡] 佐々木 進[†]

[†] ISAS/JAXA 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

[‡] 東京理科大学

E-mail: [†] ktanaka@isas.jaxa.jp,

あらまし 我々は、小型科学衛星を用いた無線送電実験のためのマイクロ波送電システムに関して、そのブレッドボードモデルの試作を行っている。本報告では、ブレッドボードシステムの概要と試作したアレーアンテナの評価に関して報告する。

キーワード 無線送電, マイクロ波, 太陽発電衛星, アレーアンテナ

Development of Breadboard Model for Space Experiments using Small Scientific Satellite toward Solar Power Satellite

Koji TANAKA[†] Ken-ichiro MAKI[†] Masashi TAKAHASHI[‡] and Susumu SASAKI[†]

[†] ISAS/JAXA 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa, 252-5210 Japan

[‡] Tokyo University of Science

E-mail: [†] ktanaka@isas.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). WPT is an inherent and critical technology of the SPS. We are considering the WPT experiment from the low earth orbit to the ground. The bread board model has a panel shapes with three functional layers: microwave radiation, amplification, and thermal radiation. The panel is designed with a total thickness of less than 5 cm. The microwave with a frequency of 5.7 GHz is totally amplified up to 160 W using the microwave circuits including 64 power amplifiers. A phased array antenna composed by 256 micro-strip elements forms and steers a microwave beam and will automatically tracks a rectenna. This report presents the design and fabrication of the array antenna. Effects of the placement errors of the array antenna units are evaluated. The beam steering by the phased array antenna is demonstrated by adjusting the local phase of the circuit.

Keyword WPT, SPS, Microwave, Array antenna

1. はじめに

人類の産業、経済活動の拡大は、豊かな暮らしをもたらす一方で、石油、石炭などの化石燃料の大量消費により、エネルギーと環境に関して、深刻な問題が認識されてきている。今後、さらに人口の増加と途上国の発展により、世界の化石燃料消費は増加の一途と考えられる。燃料の枯渇、環境悪化に対する、新しいエネルギーシステムの開発は急務である。現在の日本の宇宙開発に強く求められているのは、ロマンや夢ではなく、まさにこのような社会的に優先度の高い問題に

対して、その解決のための本格的な挑戦を始めることである。

宇宙空間には、地上と異なり広大な場と天候に左右されないふんだんな太陽エネルギーがある。太陽発電衛星の構想は、人類のフロンティアである宇宙空間を人類のエネルギー取得の場として利用しようとするものであり、クリーンで大規模なエネルギーシステムとして大きな可能性を持っている。現段階では太陽発電衛星 (SPS) が将来の人類のエネルギーシステムとして最善の選択肢であることが示されている訳ではないが、

原理の検証が未だなされていない核融合に比べて、有力な選択肢であることは間違いない。

SPS を実現するための技術研究は、JAXA[1], 各大学、USEF[2]、他の研究機関等で継続的に行われ、既に軌道上の実証実験を企画しうるレベルまで達している。SPS の成否を握る最大のキー技術である軌道上から地上へのマイクロ波送電技術は、現段階でもチャレンジングな未踏技術ではあるが、その中枢となる、高精度なビーム制御とマイクロ波の電離層との相互作用検証は、小型科学衛星を用いて検証することが可能と考えられ、最初に取り組むべき衛星を用いた宇宙実験である。

我々は、小型科学衛星に搭載し、マイクロ波を用いて低軌道から地上へ向けての送電実験実現のための送電システムに関するブレッドボードモデルの開発を行っている。本報告では、ブレッドボードモデルの概要とアレーアンテナの性能確認試験結果に関して報告する。

2. ブレッドボードモデルの概要

ブレッドボードモデルは、発振、増幅、ビーム制御、送電の機能を有する装置を層状を成す一枚のパネルで構成する。厚さは 5cm 以内に収めることを目標としている。マイクロ波無線送電を行うために、256 素子フェーズドアレーアンテナ (4 素子サブアレー×64 組) を搭載し、レクテナへのビーム伝搬方向の自動制御機能を持たせる。また、連続長時間送電を可能とするために、マイクロ波電力増幅器等からの排熱機構の設計と実装を行う。ブレッドボードモデルの主要諸元を表 1 に示す。アンテナには、4 素子サブアレーを 64 個使用するが、アンテナ素子間隔はグレーティングローブの発生を少なくするために、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 となる。なお、装置をパネル一体型とするため、増幅・移相部はこのアレーアンテナの平面寸法以内に収めることを計画している。

我々は、このブレッドボードモデルを用い、以下を計画している。

- ・複数の源振を用いた複数のアレーアンテナパネルによるビームの方向制御、ビームフォーミングの評価実験
- ・衛星搭載用ミッション機器としての電気特性、熱特性の評価。
- ・アンテナパネルの変形および配置誤差の影響評価
特に、複数のアンテナパネルを用いて形成する大規模な送電アンテナを用いる送電システムは SPS の特徴であり、独立したアンテナを有する送電パネル間の源

振統制とそれに基づく高精度なビーム方向制御、ビーム形成は重要な技術である。

表 1 ブレッドボードモデルの諸元

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	6 ビットデジタル移相器を用いた位相制御
ビーム制御方式	レトロディレクティブ
アンテナ素子数	2×2 のサブアレーを 64 個使用
偏波	直線偏波と右旋円偏波

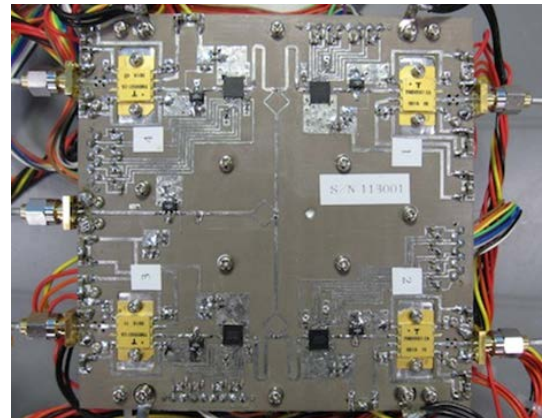


図 1 試作回路基板

ブレッドボードモデルは、3 層構造からなり、アレーアンテナの下方第 2 層に、マイクロ波発振器、増幅部、移相器を同一平面に実装する予定である。4 サブアレー用の増幅器、移相器を 1 回路基板上に形成し、16 枚の回路基板を 2 次元に配列する。増幅素子、移相器には商用のマイクロ波集積回路 (MMIC) を採用し、システムの小型化を図った。発振器から分配を繰り返して、複数の前置増幅器を介しながら、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 (総出力電力 $2.5 \times 64 = 160W$) を上層のサブアレーアンテナ (2×2 素子) に給電する。また、回路層の下層である第 3 層に放熱構造を設け、放熱の機能を持たせる。各層の厚さは、第 1 層アンテナ基板 0.8mm、第 2 層マイクロ波回路部は 3.4mm (内 3mm はベースのアルミ基板)、これらの空間を 10mm 程度 (TBD)、そして第 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。なお、今回のモデルでは太陽電池は含めないものとする。ブレッドボードモデルの 16

分の 1 の部分に相当する試作回路基板を図 1 に示す。

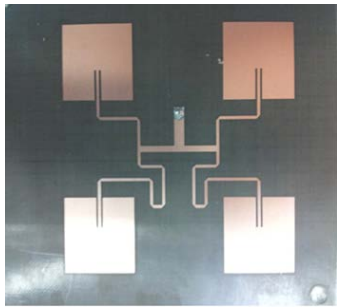


図 2 4 素子サブアレーアンテナ

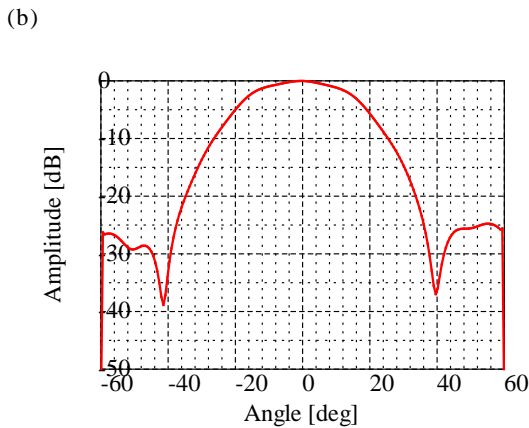
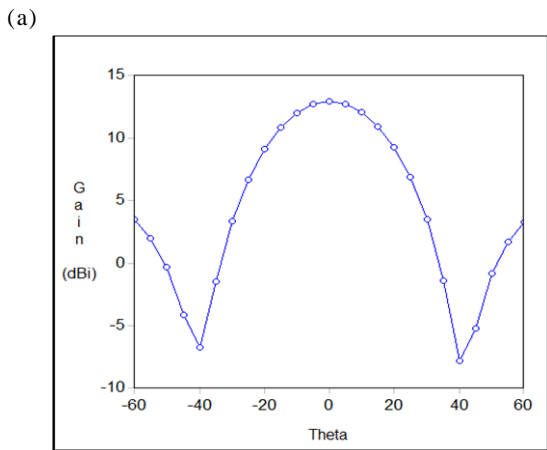


図 3 4 素子サブアレーアンテナのアンテナパターン. (a)シミュレーション結果、(b)実測結果

3. アレーアンテナの製作と評価試験

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した。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、増幅部の出力ポート一つにつき、 2×2 の 4 素子サブアレーアンテナを組み合わせた。サブアレー数 8×8 の計 64 個で構成する場合、総アンテナ素子数は 16×16 個で計 256 個のアレーアンテナとなる。



図 4 アレーアンテナ

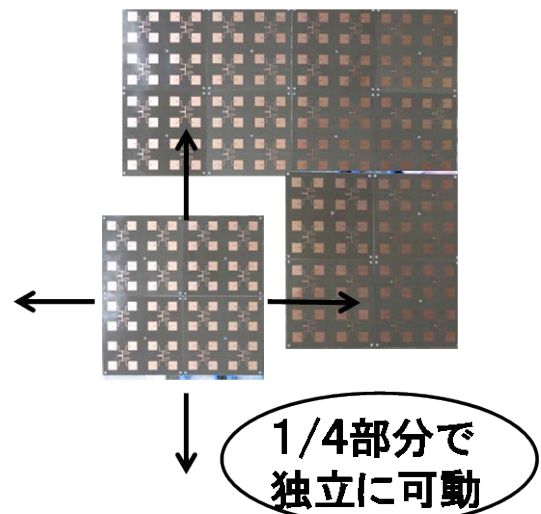


図 5 アンテナの可動単位

単一のサブアレーに関して、電磁界解析ソフトウェア SONNET を利用して設計を行った。図 2 に直線偏波のサブアレーアンテナの写真を示す。図 3(a)、(b)に放射パターンのシミュレーション結果と測定結果を示す。よく一致した結果が得られた。

次に、4 素子サブアレーアンテナを 64 個製作した。それを用いたアレーアンテナを図 4 に示す。このアレーアンテナは、形状変形や配置誤差の影響を評価するために、16 サブアレー (4×4 サブアレー) 毎に、移動することが可能である。図 5 にアンテナの可動単位を示

す。

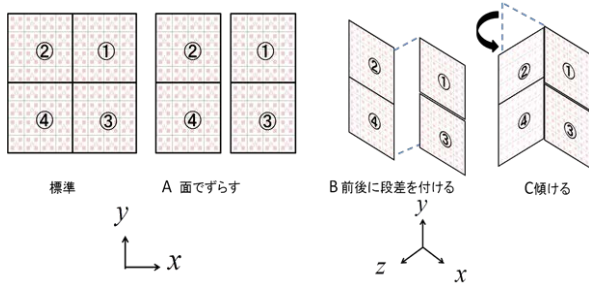


図 6 アンテナの配置方法



図 7 京都大学近傍界測定装置

増幅器及び移相器と組み合わせた実験を行う前に、アンテナとケーブルのみで位相誤差の確認を行った。次に、可動アンテナを用い、図 6 に示す、A: 平行移動、B: 段差移動、C: 傾きの三種類の配置誤差が生じた場合の放射パターンへ与える影響を実験的に評価した。

測定には、京都大学の生存圏研究所近傍界測定装置を使用した。写真を図 7 に示す。

64 サブアレーアンテナの位相分布を図 8(a) に示す。アンテナ及びケーブルの個体差による位相のばらつきが 20° 以内となるように固定移相器を挿入し、調整を行った。調整した結果得られた放射パターンを図 (b) に示す。

次に、配置誤差を与えた場合の測定結果図 9、10、11 に示す。各図では、赤線で配置誤差を付けていない場合を示し、青線で誤差を付けた場合を示した。また、平面波が放射されると仮定した場合の放射パターンの計算結果も示す。

図 9 はアンテナパネルの中央に 20mm 間隔を開けた場合である。奇数番目のサイドローブの上昇が見られ、この傾向は計算結果とも一致している。

図 10 はアンテナ中央に 10mm 段差を付けた場合の放射パターンである。平面波を仮定した計算結果も示した。サイドローブに非対称性が現れ、その傾向は、実測値と計算結果でよく一致している。

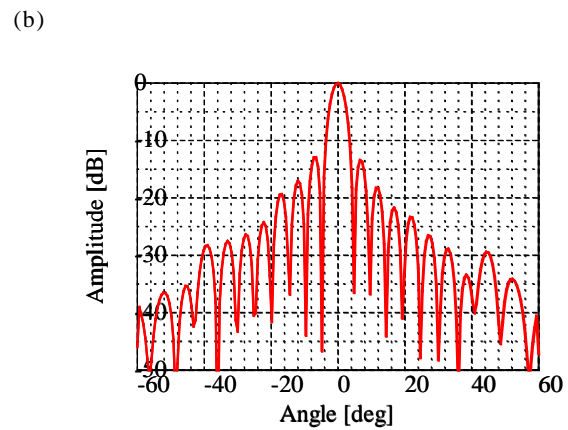
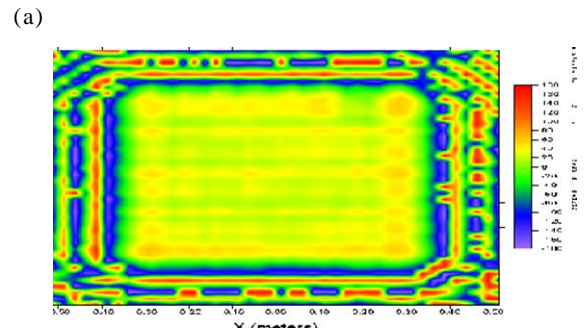


図 8 近傍界測定装置での放射パターンの測定結果 (a) 移相調整結果、(b) 16×16 ユニットの放射パターン

図 11 に、中央で 5° 傾きを付けた場合の結果を示す。この結果も、サイドローブが変化する傾向は、測定値と計算結果では近い傾向が得られた。

次に、4 個の円偏波サブアレーアンテナを用いて、一次元方向のビーム掃引試験を行った。放射パターン計測には ISAS/JAXA の電波暗室と計測システムを使用した。4 サブアレーアンテナの外観を図 12 に示す。アレーアンテナの移相制御には、図 1 に示した 4 個の移相器を搭載した試作回路を用いた。デジタル移相器での位相制御量を実測し、その実測値を元に目標ビーム方向角度に対する 6 ビットの制御信号をデジタル移相器の各ポートに入力し、ビームの方向制御を行った。図 13 に走査ビームの放射パターンの実測結果を示す。これには、目標走査角度 $-10, -5, 0, +5, +10^\circ$ の 5 種パターンが含まれる。目標が正面 0° の際、メインローブのピークは -2° の方向にあり、これにはアンテナを回転ステージに設置する際の初期設置誤差が含まれると考える。目標値 $-10, -5, +5, +10^\circ$ に対して、 0° の場合を基準とした際の相対角度の実測値はそれぞれ、 $-9, -4.5, +5, +9.5^\circ$ 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。

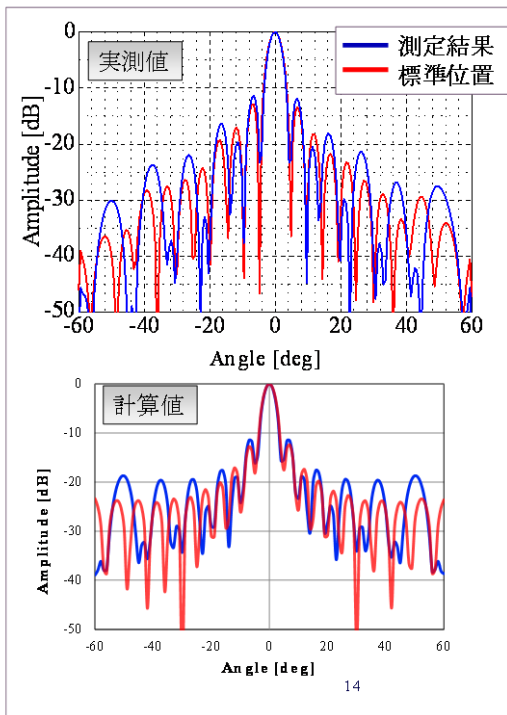


図9 アンテナ中央に間隔(20mm)をあけた場合

4. まとめ

我々は、無線送電実験のためのブレッドボードモデルの試作を開始し、それに用いるアレーアンテナの設

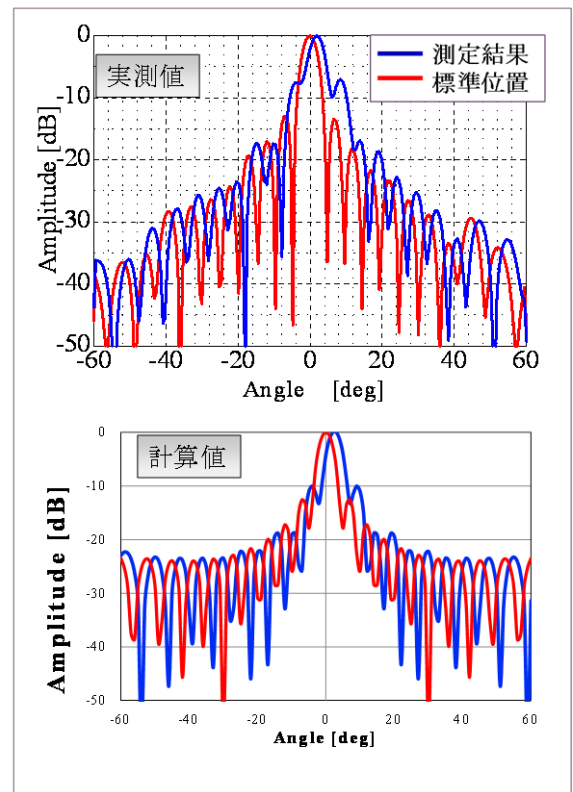


図11 アンテナ中央で5°傾けた場合

計、製作を行った。近傍界測定装置を用い、アンテナ及び接続ケーブルの位相誤差の計測と調整を行った。

上記アレーアンテナを用いた3種類の配置誤差の影響評価試験では、いずれも位相変化分から予想される放射パターンが得られており、今後、増幅器や移相器と組み合わせた実験への移行準備が完了した。今後は、本ブレッドボードモデルを用い、マイクロ波無線送電の実験を行うとともに、衛星搭載機器開発のための基礎データの取得を行う。

5. 謝辞

本研究では、京都大学生存圏研究所マイクロ波エネルギー伝送実験装置(METLAB)及びJAXA宇宙科学研究所の電波暗室を使用させていただきました。関係の皆様には感謝いたします。

文 献

- [1] 三菱総研：2006年度宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書宇宙エネルギー利用システム総合研究, 2007年3月.
- [2] (財)無人宇宙実験システム研究開発機構：平成18年太陽光発電利用促進技術調査成果報告書, 平成19年3月.

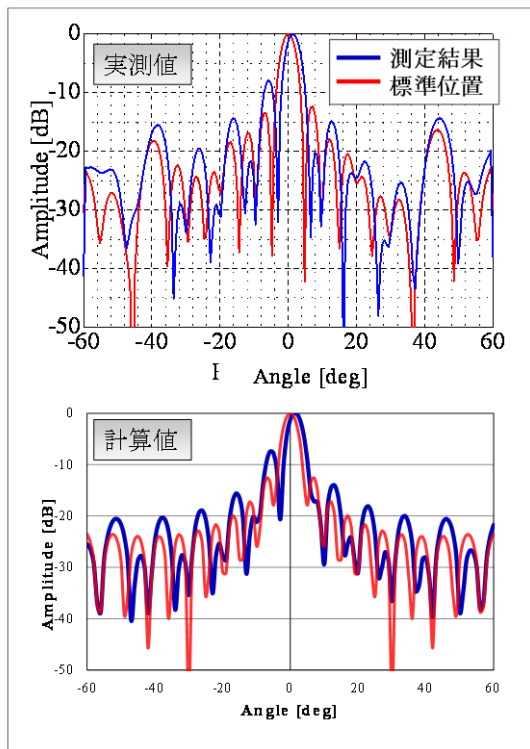


図10 アンテナ中央に段差(10mm)を付けた場合

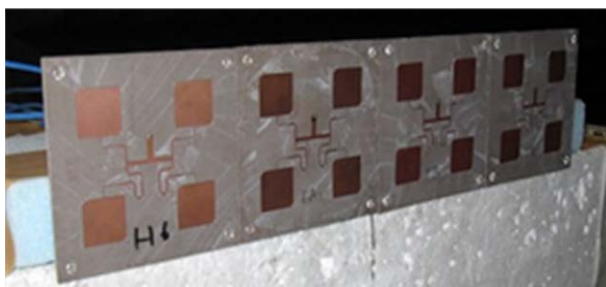


図 12 円偏波 4 サブアレーアンテナ

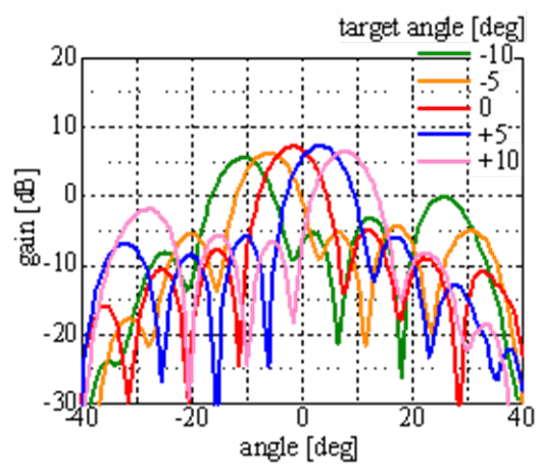


図 13 4 サブアレーアンテナのビーム方向制御試験