

SPS 小型実証実験衛星搭載用アンテナにおけるアンテナ素子配列の検討

井上 史也[†] 田中 孝治[‡] 牧 謙一郎[‡] 高橋 将司[†]

宮代 健吾^{‡‡} 村口 正弘[†] 佐々木 進[‡]

[†] 東京理科大学工学部 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

[‡] 宇宙航空研究開発機構 宇宙エネルギー工学研究室 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

^{‡‡} 東京大学 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: inoue.fumiya@ac.jaxa.jp

あらまし 本稿では、当研究室で開発中のブレッドボードモデルの放射パターンに関する測定結果をモーメント法とフレネル近似によるシミュレーション結果と比較し、評価した結果の報告を行う。さらに、SPS 小型実証実験衛星搭載用アンテナにおけるアンテナ素子配列を論じ、マイクロ波送電実験におけるアンテナ形状変化によるビームフォーミングへの影響を考慮することで、実際に SPS 小型実証衛星を用いてマイクロ波送電技術実証実験を行う際の地上観測点の検討を行う。

キーワード 太陽発電衛星, 宇宙太陽発電システム, 無線電力伝送

Simulation of phased array antenna for SPS small satellite experiment

Fumiya INOUE[†] Koji TANAKA[‡] Ken-ichiro MAKI[‡] Masashi TAKAHASHI[†]

Kengo MIYASHIRO^{‡‡} Masahiro MURAGUCHI[†] and Susumu SASAKI[‡]

[†] Tokyo University of Science 1-3 Kagurazaka, Shinjyuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

[‡] Japan Aerospace Exploration Agency 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku Sagamihara-shi, Kanagawa, 252-5210 Japan

^{‡‡} University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

E-mail: inoue.fumiya@ac.jaxa.jp

Abstract In this paper, I compared measured radiation patterns of the breadboard model with simulation results by the method of moments and the Fresnel approximation. In addition, I make a preliminary evaluation arrangement of array antenna elements for the SPS small demonstration satellite. The purpose 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 the intense microwave. And I discuss on the ground observation method of the microwave became radiated from the SPS small demonstration satellite.

Keyword Solar Power Satellite, Space Solar Power System, Wireless power transmission

1. 序論

SSPS(宇宙太陽発電システム)とは、宇宙空間で巨大なソーラーパネルを用い、太陽光発電で得た電気エネルギーを、マイクロ波、あるいはレーザーを用い地上に無線で送電して利用する新しい電力システムである。地上での太陽発電と比較して、天候に左右されず、かつ夜間でも安定的かつ大電力を供給することができるという特徴があり、昨今注目を集めている。

SPS(太陽発電衛星)は、このシステムにおいて、宇

宙空間で発電した電力を地上に向けて送電する衛星軌道の上に建設する発電所のことを指す。SPS から地上へ電力を送電する場合、特に以下の3つの特徴が挙げられる。すなわち、(i)送電アンテナが km オーダーの巨大な大きさであり、その素子数は数十億個であるということ、(ii) 静止衛星軌道から送電する際は、送電と受信側の間に 36,000km というかなりの距離があるということ、(iii)アンテナ面は日照や日陰等の影響により変形するという点である。したがって、SPS が静止衛星軌道の上に建設され

る場合、高度 36,000km の上空から地上まで長距離に渡り、かつ衛星ダイナミクスを考慮した高精度なビーム制御技術が求められる。このような技術は SPS による無線電力伝送において求められる固有の問題であり、最も重要な研究課題の一つである。そのため、現在、小型衛星を用いた衛星軌道上から地球への実証実験の検討が進められている。

本稿では、まず、当研究室で開発中のブレッドボードモデルの測定結果をモーメント法とフレネル近似によるシミュレーション結果と比較し、評価する。つぎに、SPS 小型実証実験衛星搭載用アンテナにおけるアンテナ素子配列を論じ、マイクロ波送電実験におけるアンテナ形状変化によるビームフォーミングへの影響を考慮することで、実際に SPS 小型実証衛星を用いてマイクロ波送電技術実証実験を行う際の地上観測点の検討を行う。

2. ブレッドボードモデルの開発

図 1 に、現在当研究室で開発しているマイクロ波送電装置のブレッドボードモデルの構成を示す。ブレッドボードモデルは 16 個の出力ユニットから構成される。出力ユニットには発振器から出力された周波数 5.7GHz のマイクロ波が入力され、それぞれ移相器および電力増幅器を経たのち、アンテナへ出力される。移相器には 6bit デジタル移相器を使用した。アンテナへの各ポートからの最大出力電力は平均して 3.6W である。そして、これら出力ポートにはパッチアンテナが接続される。本実験では 4 つの出力ユニットを使用し、全体で縦 4 素子、横 16 素子、計 64 個のアンテナ素子からマイクロ波を放射し、実験を行った。

図 2, 3 にブレッドボードモデルのアンテナ配列の様子と外観、及び構造をそれぞれ示す。本モデルは 3 層構造を有する薄型パネルを成している。各層にはそれぞれ異なる機能を持つ機器が搭載されている。すなわち、第 1 層は、送電アンテナ、第 2 層は増幅・位相制御回路、そして第 3 層は放熱器であり、合計の厚さは 52mm(放熱器を除く場合 22mm)である。

放射パターン測定実験は京大生存圏研究所マイクロ波エネルギー伝送実験装置(METLAB)及び宇宙科学研究所の電波暗室にて行った。

実験値の評価に当たっては、正面方向(0°)と 10° にビーム方向制御を行った場合の測定結果をモーメント法とフレネル近似によるシミュレーション結果と比較した。0° における比較を図 4 に、+10° における比較を図 5 にそれぞれ示す。さらに、各々の条件における半値幅をそれぞれ表 1 と表 2 に示す。図 4 と図 5 より、フレネル近似とモーメント法によるシミュレーション結果はメインローブから±15° の範囲でほぼ一致していることが確認される。表 1 と表 2 より、0° と+10°

のそれぞれの場合における半値幅のシミュレーション値と実験値との差はいずれも 5%未満となっていることが確認された。

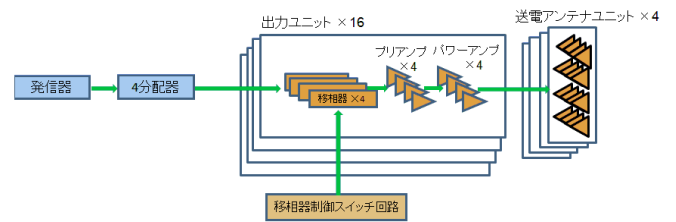


図 1 送電系の機能ブロック図

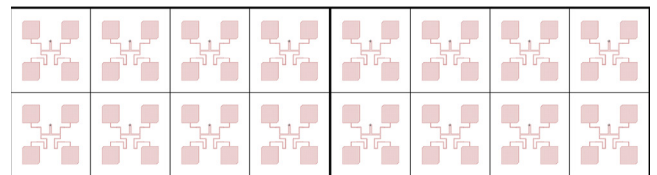


図 2(a)ブレッドボードモデルのアンテナ配列

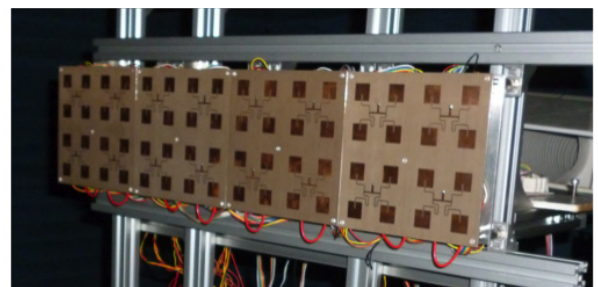


図 2(b)ブレッドボードモデル外観(前面)

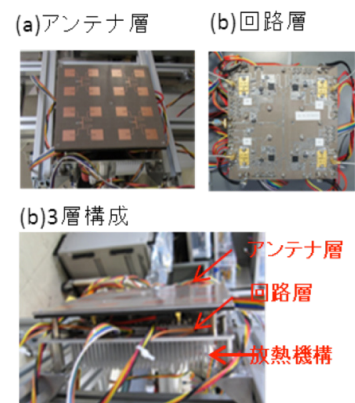


図 3 ブレッドボードモデルの 3 層構造

表 1 0[deg]での半値幅

	半値幅[deg]	実験値との差 [%]
実験値	4.36	
フレネル近似	4.18	4.31
モーメント法	4.20	3.81

表 2 +10[deg]での半値幅

	半値幅[deg]	実験値との差 [%]
実験値	4.41	
フレネル近似	4.37	0.92
モーメント法	4.20	5.00

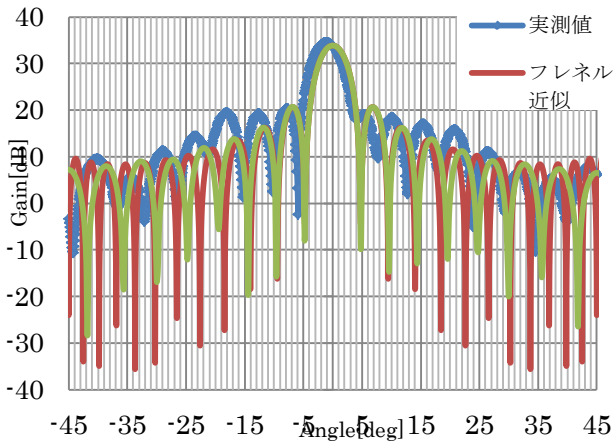


図 4 0[deg]での比較

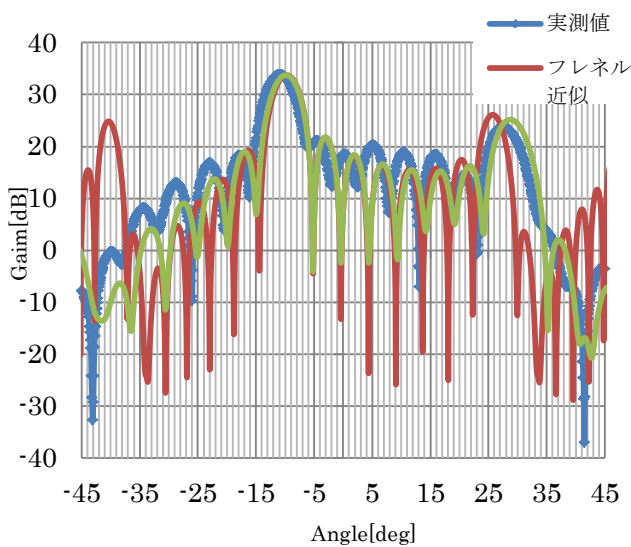


図 5 +10[deg]での比較

3. SPS 小型実証衛星の検討

3.1 SPS 小型実証衛星の概要

序論でも述べたように、現在、JAXA では小型衛星を用いた SPS 技術実証実験の検討が進められている。その実験運用シーケンスを図 6 に示す。衛星軌道は 370km の準回帰軌道が検討されており、その場合、3 日に 1 回決まった観測地点での送電実験が可能である。想定ミッション重量は 200kg 程度である。地上アンテナ郡上空を SPS 小型実証衛星が通過する±8 秒の間、高出力マイクロ波を放射させるビーム制御実験を計画している。平均電力密度はアンテナ部で 705W/m^2 、地上電力密度は 2kW 出力の場合約 $16\mu\text{W/m}^2$ (最大)と想定しており、マイクロ波ビーム制御は搭載 CPU 制御及び地上からのパイロット信号によるソフトウェアレトロ方式で行う。地上での中心観測場所は JAXA 勝浦局を予定しており、パイロット信号 UPLINK 局(数十 W~kW 級)や受信アンテナアレイといった施設が必要となる。

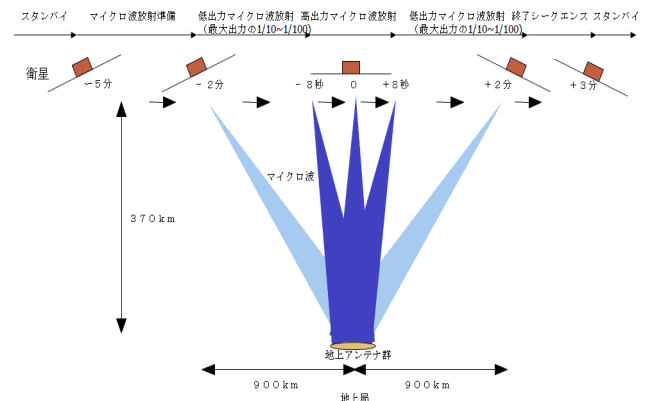


図 6 SPS 小型実証衛星実験運用シーケンス

3.2 アンテナ素子配列によるビームフォーミングへの影響

SPS 小型実証衛星では、複数の送電ユニットを用いた送電実験のために送電アンテナを 4 分割し、それぞれ位相同期を行いながら、方向制御とビームフォーミングを行うシステムを検討している。

送電システムとしては送電用の大型アレーアンテナパネルと位相制御用のマイクロ波回路の検討を行う必要がある。しかし、マイクロ波回路はアンテナの形状、および重さはアレーアンテナの形状によって大きく左右されるため、先にアレーアンテナの形状を決定する必要がある。現在、当研究室では、SPS 小型実証衛星搭載用のアンテナの素子配列の検討を進めている。SPS 小型実証衛星における送電系の機能ブロック図を図 7 に、ミッション機器搭載形

態を図 8 にそれぞれ示す。送電システムは 4 系統から構成され、それぞれで位相同期を行う。ここで、検討されているサブアレーアンテナ配列案を図 9 に示す。図 8 から明らかなように、アンテナパネル面の外周はイプシロンロケットのフェアリングに依存する。また、観測用のプローブや計測アンテナを搭載しなければならない関係上、アンテナの中央を十字にクロスしてサブアレーが配列できない。そのため、アンテナパネルを、中心を基準として $\lambda/2$ ずつ 4 つに分けることで対応する。これらサブアレーの配列条件を表 3 にまとめる。

現在検討されているアンテナ面のサブアレー配列は、アンテナパネル面の外周を 1,750mm とし、その周波数は 5.8GHz, 素子間隔が 0.63λ のサブアレー配列である。本項では 1 次元方向のみに着目し、アンテナ配列数が 1 次元方向で最大となる 26 サブアレー(1 パネル一列最大数:13 サブアレー)に関して、サブアレーが配列されない各パネル間の間隔をあけたことによるビームフォーミングへの影響をフレネル近似によるシミュレーションを用いて比較し、評価した。なお、アンテナパネル間の間隔は、基準の 0λ から 1.0λ (1 素子間隔)と 2.0λ (2 素子間隔)あけた場合についてそれぞれ比較を行った。これを図 10 に示す。さらに、このときの半値幅の比較を表 4 に、第一サイドローブの比較を表 5 にそれぞれ示す。

図 10 より、 $\pm 5^\circ$ の範囲ではビームの形状自体はあまり変化していないことがわかるが、それ以降はビームパターンに大きな違いが出ていることが確認される。表 4 より、パネル間間隔を広げれば広げるほど半値幅が低下していることが確認される。表 5 より、第一サイドローブは半値幅とは逆に大きくなっていることが確認される。これは、間隔をあけていない場合と比較して、主ビーム以外でのエネルギー損失がそれだけ大きくなっていることを示している。よって、各パネル間の間隔をあけるとそれだけエネルギー損失が大きくなり、主ビームがシャープになると考えられる。

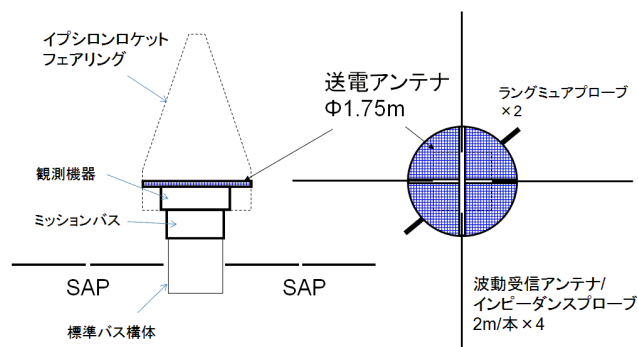


図 8 ミッション機器搭載形態

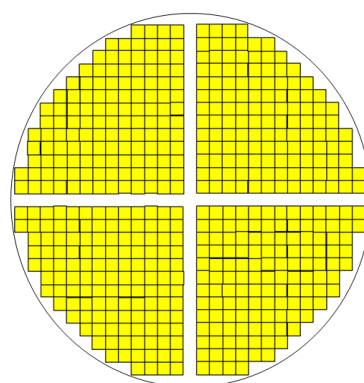


図 9 サブアレー配列案

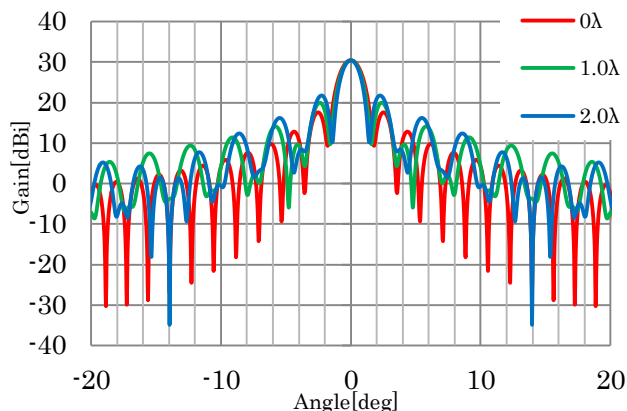


図 10 1次元でのパネル間隔による影響

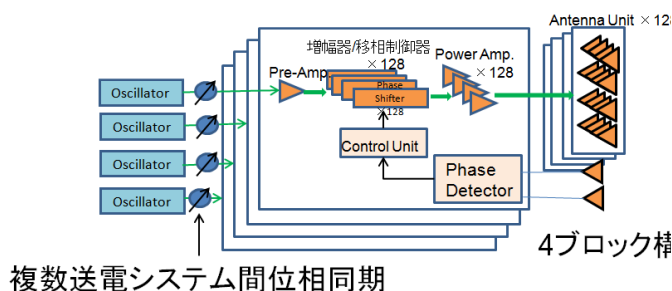


図 7 送電系の機能ブロック図

表 3 サブアレー配列条件

外周	Φ1,750mm
周波数	5.8GHz
素子間隔	0.63λ
4ブロック構成 4素子サブアレー サブアレー数/1パネル	128個
素子数/1パネル	512個
全素子数	2048個
放射電力	Typical. 2kW

表 4 半値幅の比較

間隔	半値幅[deg]	基準との差[%]
0λ	1.55	
1.0λ	1.43	8.39
2.0λ	1.20	29.17

表 5 第一サイドローブの比較

間隔	Gain[dBi]	基準との差[%]
0λ	17.59	
1.0λ	19.97	11.92
2.0λ	21.76	19.16

3.3 マイクロ波送電技術実証実験時の地上観測点の検討

3.1のSPS小型実証衛星の概要でも述べたように、SPS小型実証衛星を用いたマイクロ波送電実験技術を実証する際の中心地上測定場所として、JAXA勝浦局を予定している。勝浦局では衛星の追跡ならびに管制を行う。その際、勝浦局の周辺に、電界強度計等を配置し、マイクロ波ビームの到達位置やそのビーム形状を計測評価する必要がある。そのためには、JAXA勝浦局を中心とした適切な計測点の配置が必要である。

そこで、本項では、3.2で行ったアンテナパネル間の間隔を考慮した素子間ビームフォーミングの検討をもとに、地上観測点配置の最適化について考察する。

3.2節ではアンテナ配列数を1次元方向で最大となる26サブアレー(1パネル一列最大数：13サブアレー)で配列し、パネル間間隔がビームフォーミングに与える影響の検討を行った。

ビーム到達位置と形状評価には、最大値とヌルポイントの高精度計測と電界強度分布の評価が必要である。それぞれのアンテナパネル間間隔とヌルポイントとの関係を表6に示す。パネル間距離をお菊取れば取るほどヌルポイントが中央観測地点に接近していることがわかる。

今回、アンテナパネル間の間隔を1.0λとすれば、

中心からヌルポイントまでの距離は10.18kmである。これと電界強度の減衰から観測地点を決定した。すなわち、図11の赤い破線で示しているように、電力中央密度から比較して電力が半分ずつに減衰される地点に観測点を設置するようにした。表7に中心観測地点からの電界強度減衰と距離との関係を示す。ヌルポイント確認のため、ヌルポイント以降にも3点ほど観測点を設けている。これにより、マイクロ波強度と中心からの距離の関係から電界強度を考慮し、効率良くSPS小型実証衛星からのマイクロ波を受電することが出来ると考えられる。

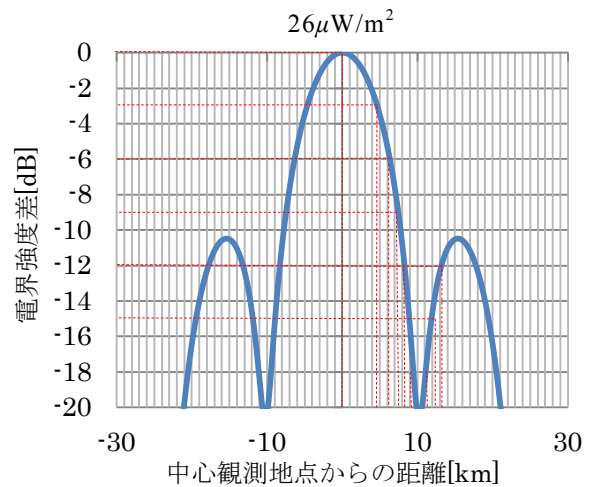


図 11 マイクロ波強度と中心からの距離の関係

表 6 パネル間間隔とヌルポイントの関係

間隔	中心からの距離 [km]
0λ	11.66
1.0λ	10.18
2.0λ	9.07

表 7 中心からの電界強度の減衰量と距離の関係

減衰量[dB]	距離[km]
0	0
3	4.63
6	6.11
9	7.59
12	8.33
15	9.07
18	9.81
20.7(Null Point)	10.18
18	10.92
15	11.66
12	13.14

4. まとめ

本稿では、当研究室で開発中のブレッドボードモデルの測定結果の評価を行い、開発したシミュレーションソフトの有用性を実証した。電磁界シミュレータによるモーメント解析法は相互結合等の誤差が考慮されているため演算結果が正確ではあるが、解析時間がかかるため SPS 等における大規模アレーの解析には向いていない。今回の検討により、フレネル近似解析法は誤差が考慮されていない分正確性はモーメント解析法に劣るものの、高速に演算することができる上に、メインローブ近傍では十分な解析精度を持っていることが確認された。

また、SPS 小型実証実験衛星搭載用アンテナにおけるアンテナ素子配列を論じ、マイクロ波送電実験におけるアンテナ形状変化によるビームフォーミングへの影響を考慮することで、実際に SPS 小型実証衛星を用いてマイクロ波送電技術実証実験を行う際の地上観測点の検討を行った。

参考文献

- 1) 牧, 田中, 佐々木, 川原, 鎌田, 高橋, 宮代, 小紫, “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, 1H03, 松山(2011)
- 2) K. Maki, M. Takahashi, K. Miyashiro, K. Tanaka, S. Sasaki, K. Kawahara, Y. Kamata, and K. Komurasaki, "Microwave Characteristics of a Wireless Power Transmission Panel Toward the Orbital Experiment of a Solar Power Satellite," Proceedings on 2012 IEEE MTT-S IMWS-IWPT, Kyoto, pp.131-134 (2012)
- 3) 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”