

# 太陽発電衛星のブレッドボードモデルにおける 送電ビームの位相補正効果の検証

井上 史也<sup>†‡</sup> 田中 孝治<sup>‡</sup> 牧 謙一郎<sup>‡</sup> 高橋 将司<sup>†</sup>

宮代 健吾<sup>‡‡</sup> 村口 正弘<sup>†</sup> 佐々木 進<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 東京理科大学工学部 〒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 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

<sup>‡‡</sup> 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** 本論文では,当研究室で開発している衛星搭載実験用マイクロ波送電装置のブレッドボードモデルを用いたフェーズドアレーアンテナシステムにおける位相補正を加える前と各素子に位相補正を適用し等位相面の最適化を図った状態でのアンテナからの放射パターンのビーム方向精度の向上に関する実験的な検証に関して述べる.さらに,実験値をシミュレーション値と比較することで,位相誤差と振幅誤差による影響を精査し,送電ビーム方向精度への影響を評価する.

**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

## Evaluation of the Microwave Power Transmission characteristics of the Breadboard Model for SPS Small Satellite Demonstration Experiment

Fumiya INOUE<sup>†‡</sup> Koji TANAKA<sup>‡</sup> Ken-ichiro MAKI<sup>‡</sup> Masashi TAKAHASHI<sup>†</sup>

Kengo MIYASHIRO<sup>‡‡</sup> Masahiro MURAGUCHI<sup>†</sup> and Susumu SASAKI<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Tokyo University of Science 1-3 Kagurazaka, Shinjyuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

<sup>‡</sup> Japan Aerospace Exploration Agency 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku Sagamihara-shi, Kanagawa, 252-5210 Japan

<sup>‡‡</sup> University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

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

**Abstract** We are developing a breadboard model of a wireless power transmission system. I carried out performance evaluation experiments of the breadboard model and evaluated the effect of the amplitude and phase error on the radiation pattern from the phased array antenna. Also, I analyzed the radiation pattern of the breadboard model by 3D field simulator and compared simulated values with measured values.

### 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発電システムである.地上での太陽光発電と比較して天候に左右されず,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大きな特長がある.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)静止衛星軌道上から送電する際は,送電と受電側の間に 36,000km という大きな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 1 つである。

本研究は、マイクロ波送電型 SPS における大規模フェーズドアレーアンテナによる送電ビームの精密制御技術の確立を目的としている。

無線電力伝送におけるマイクロ波無線送電ビームの精密制御のためには、所望のビーム方向に対応するアンテナ各素子間の位相関係を正確に調整することが要求される。しかしながら、実際の送電装置には、デバイスの個体差や製作誤差等の理由により、素子全体で位相の不均一性が無視できない程度に現れる可能性がある。

そこで、本論文では、当研究室で開発している衛星搭載実験用マイクロ波送電装置のブレッドボードモデルを用いて、位相補正を加える前と各素子に位相補正を適用し等位相面の最適化を図った状態でのアンテナからの放射パターンを測定し、位相補正によるビーム方向精度の向上効果を検証する。さらに、実験値をシミュレーション値と比較することで、位相誤差と振幅誤差による影響を検出し、送電ビーム方向精度への影響を評価する。

これらの結果を踏まえ、ブレッドボードモデルを用いた地上での長距離送電実験と SPS 小型実証衛星からの送電実験、ならびに将来の商用 SPS を考える上で、現在の段階でどれぐらい合理的な値が得られているかを検討する。

## 2. 実験概要

図 1 に当研究室で開発中の SPS 送電実験用ブレッドボードモデルの送電システムブロック図を示す。SPS から放射するマイクロ波ビームは精密に制御する必要がある。精密なビーム制御を行うためには、送電アンテナの各素子間の位相情報を正確に与えることが要求される。しかし、図 1 から明らかなように、この送電システムにはアンプや移相器などのマイクロ波素子が接続されており、これらの各素子に個体差や製作精度等による位相誤差  $\Delta\phi$  が存在している。また、増幅器(Amp)には温度依存性  $\Delta\phi(T)$  も存在しており、他にも電力ケーブル等の線路長にも個体差があり、これらは位相誤差が生じる原因となると考えられる。

図 2 に今回の実験でのブレッドボードモデルの機能ブロック図を、表 1 に今回の実験での具体的なマイクロ波送電装置の構成をそれぞれ示す。さらに、図 3 に実験でのブレッドボードモデルのアンテナ配列の様子を、図 4 に外観をそれぞれ示す。

発振器から出力された周波数 5.7GHz のマイクロ波はまず 4 分配され、各モジュールにそれぞれ入力される。各モジュールには 4 つのポートがあり、それぞれに

6bit デジタル移相器、前置増幅器、電力増幅器の順に接続されている。これらの出力ポートにパッチアンテナを接続する。

このとき、モジュールの各ポートに  $2 \times 2$  素子のサブアレーアンテナが対応しており、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が放射される(サブアレー数に言い換えると縦 2 個、横 8 個、計 16 個)。全体の寸法は縦 158mm、横 632mm である。

位相補正を加える前と、各素子に位相補正を適用し等位相面の最適化を図った状態で正面方向( $0^\circ$ )と  $+5^\circ$  にビーム方向制御を行った場合の遠方界と近傍界の放射パターンをそれぞれについて測定した。これにより、位相の不均一性を検出し、ビーム方向精度の向上効果を実験的に検証した。

さらに、実験値をシミュレーション値と比較することで、位相誤差と振幅誤差による影響を検出し、送電ビーム方向精度への影響を評価した。

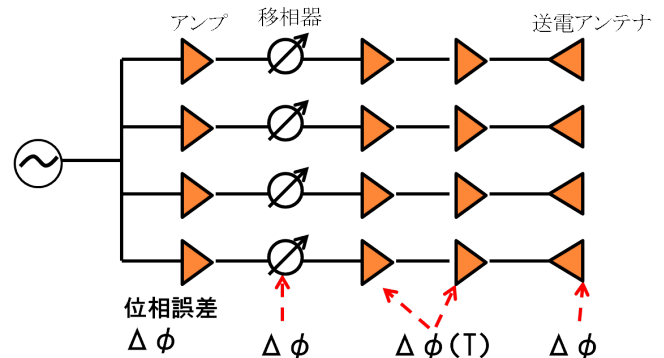


図 1 送電システムブロック図

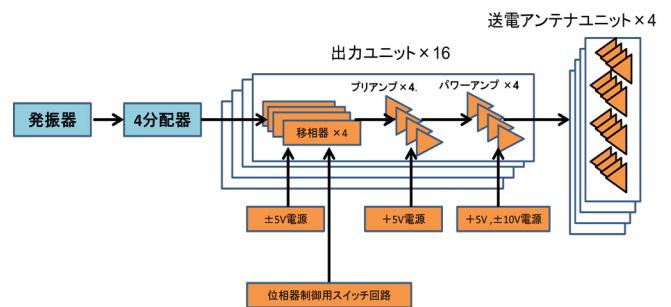


図 2 ブレッドボードモデルの機能ブロック図

表 1 実験でのブレッドボードモデルの構成

出力ユニット	16 個
周波数	5.7GHz
位相制御器	6bit デジタル移相器
最大出力電力	57.6W(3.6W×16)
アンテナ素子数	64 素子(縦 4×横 16)
合計の厚さ	52mm

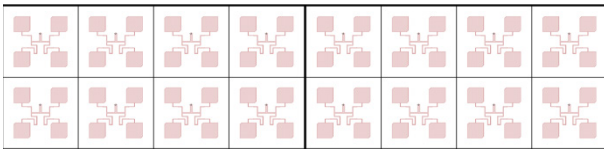


図3 ブレッドボードモデルのアンテナ配列

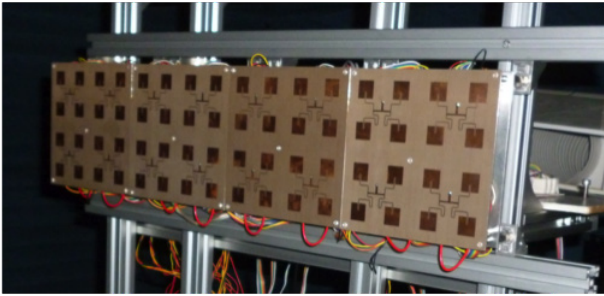


図4 ブレッドボードモデル外観(正面)

### 3. 実験結果

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)での測定の様子を,以下の図5に示す.

測定は,位相補正を加える前と,各素子に位相補正を適用し等位相面の最適化を図った状態について,正面方向( $0^\circ$ )と $+5^\circ$ にビーム方向制御を行った場合の遠方界と近傍界の放射パターンの計測をそれぞれについて行なった.

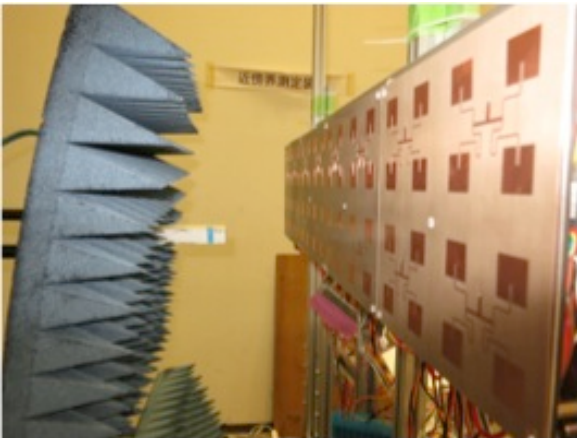
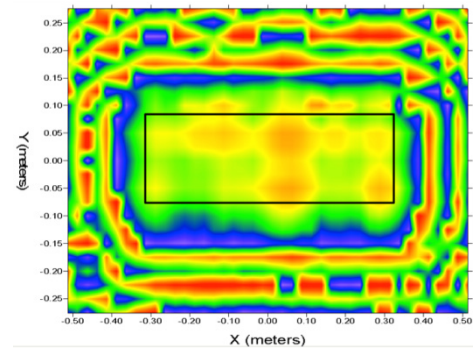


図5 測定の様子

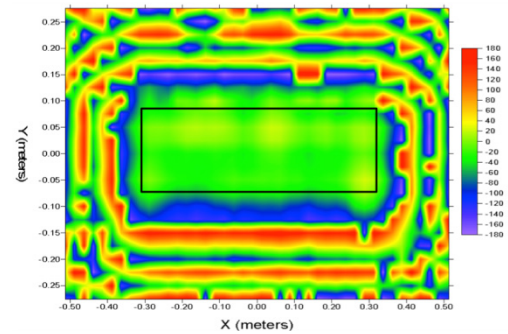
#### 3.1 位相補正によるビーム方向精度の向上効果の検証

図6に位相補正前後の近傍界放射パターンの測定結果をそれぞれ示す.目標ビーム方向は $0^\circ$ (正面)である.走査範囲内の受信プローブ位置に対応する2次元座標において,位相を色の違いで表している.図中の黒い枠が,送電アンテナが存在する範囲を示している.図6(a)の位相補正前の分布では,アンテナ面前方において,位相差が $101^\circ$ の範囲でばらつきが確認できる.全体的に,アンテナ中心部と両側部との間の位相差が顕著に見受

けられる.この状態の位相の標準偏差は $13.1^\circ$ であった.一方,図6(a)の測定から得られた位相差から補正値を適用した場合のパターンが図3.2(b)である.図における色の単一性が増し,位相誤差が低減されていることがわかる.このときの位相の標準偏差は $9.2^\circ$ であり,30%の改善が確認された.



(a)位相補正前



(b)位相補正後

図6 近傍界放射パターンの違い

さらに,正面方向( $0^\circ$ )での位相補正を行なった場合と補正を行っていない場合の放射パターンの比較を以下の図7に,半値幅の比較を表2に,送電電力全体を100%とした際のメインローブでのエネルギー密度の比較を表3に,第一サイドローブでのピークのエネルギー密度の比較を表4にそれぞれ示す.

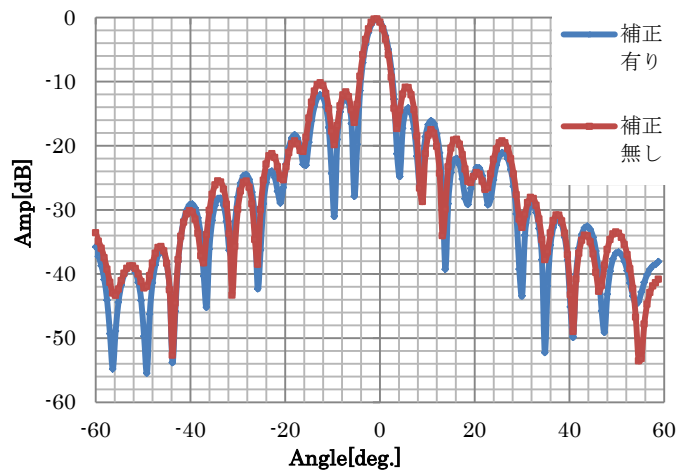


図7 正面方向( $0^\circ$ )での放射パターンの比較

表 2 正面方向(0°)での半値幅の比較

	半値幅[deg]
補正なし	4.2
補正あり	3.6

表 3 正面方向(0°)でのメインローブの比較

	メインローブ[%]
補正なし	80.6
補正あり	86.1

表 4 正面方向(0°)での第一サイドローブの比較

	第一サイドローブ[%]
補正なし	8.1
補正あり	5.1

表 2 より,補正なしの場合と比較して補正ありの場合は半値幅が 0.6° 小さくなり,メインビームの指向性が上昇していることが確認される.表 3 と表 4 より,位相を補正すればメインローブのエネルギー密度が 5.5%上昇し,第一サイドローブが 3.0%減少していることが確認される.すなわち,位相を補正すればメインローブでの指向性が上がり,そのエネルギー密度も上昇するため,主ビームの質が向上すると考えられる.

同様に,5° ビーム掃引時での位相補正を行なった場合と補正を行っていない場合の放射パターンの比較を以下の図 8 に,半値幅の比較を表 5 に,送電電力全体を 100%とした際のメインローブでのピークのエネルギー密度の比較を表 6 に,サイドローブでのピークのエネルギー密度の比較を表 7 にそれぞれ示す.

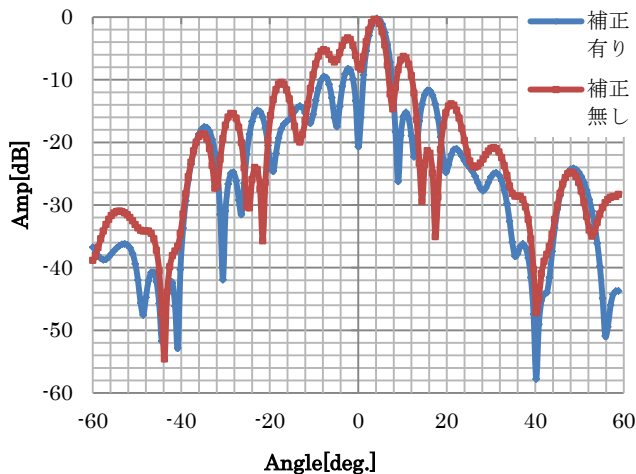


図 8 5° ビーム掃引時での放射パターンの比較

表 5 5° ビーム掃引時での半値幅の比較

	半値幅[deg]
補正なし	3.0
補正あり	3.6

表 6 5° ビーム掃引時でのメインローブの比較

	メインローブ[%]
補正なし	81.0
補正あり	88.4

表 7 5° ビーム掃引時での第一サイドローブの比較

	第一サイドローブ[%]
補正なし	7.7
補正あり	5.9

表 5 より,補正なしの場合と比較して補正ありの場合は半値幅が 0.6° 大きくなっていることが確認される.表 6 と表 7 より,位相を補正すればメインローブのピークでのエネルギー密度が 7.4%上昇し,第一サイドローブが 1.8%減少していることが確認される.すなわち,補正ありの場合では補正をしなかった場合と比較してメインローブの指向性が低くなっているものの,エネルギー密度は上昇しているため,正面方向(0°)での結果と同様に主ビームの質は向上していると考えられる.

### 3.2 位相と振幅誤差が与えるビームフォーミングへの影響の検証

3.1 節においては,測定結果をもとに位相補正によるマイクロ波ビームの方向精度の向上効果を検証した.

本節では,実験結果から得られた位相誤差と振幅誤差をシミュレーション値に与えることにより,これら誤差がアンテナのビームパターンおよびビームフォーミングに及ぼす影響を検証する.

以下の図 9 に正面方向(0°)での実験値と位相と振幅の誤差を考慮したシミュレーション値との放射パターンの比較を示し,半値幅の比較を表 8 に,メインローブと第一サイドローブのピークのエネルギー密度の比較を表 9 と表 10 にそれぞれ示す.

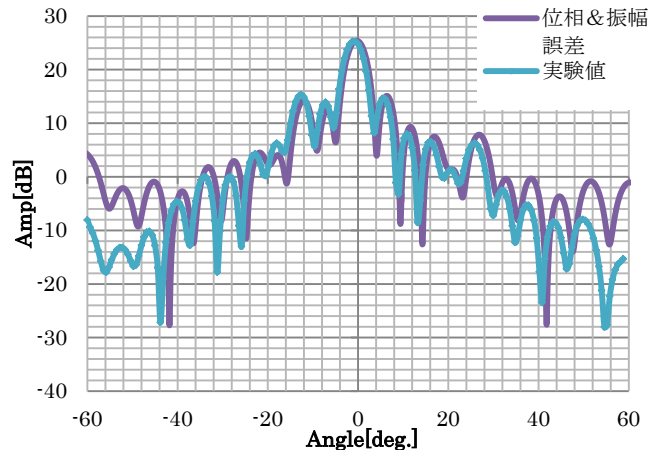


図 9 正面方向(0°)での比較

表 8 正面方向(0°)での半値幅の比較

	半値幅[deg]
実験値(補正あり)	3.6
シミュレーション値	4.1

表 9 正面方向(0°)でのメインローブの比較

	メインローブ[%]
実験値(補正あり)	86.1
シミュレーション値	81.0

表 10 正面方向(0°)での第一サイドローブの比較

	サイドローブ[%]
実験値(補正あり)	5.1
シミュレーション値	7.3

表 8 から表 10 より,半値幅は 0.5° の誤差が,メインローブでは 5.1%の誤差が,第一サイドローブでは 2.2%それぞれ誤差が確認されたものの,図 9 より放射パターンはほぼ一致することが確認された。

同様にして,以下の図 10 に 5° ビーム掃引時での実験値と位相と振幅の誤差を考慮したシミュレーション値との放射パターンの比較を示し,半値幅の比較を表 11 に,メインローブと第一サイドローブのピークのエネルギー密度の比較を表 12 と表 13 にそれぞれ示す。

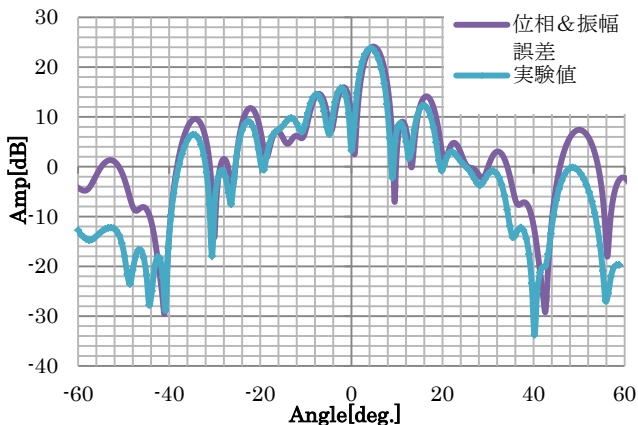


図 10 5° ビーム掃引時での比較

表 11 正面方向(0°)での半値幅の比較

	半値幅[deg]
実験値(補正あり)	3.6
シミュレーション値	3.8

表 12 正面方向(0°)でのメインローブの比較

	メインローブ[%]
実験値(補正あり)	88.4
シミュレーション値	66.9

表 13 正面方向(0°)での第一サイドローブの比較

	サイドローブ[%]
実験値(補正あり)	5.9
シミュレーション値	8.2

表 11 から表 13 より,半値幅は 0.2° の誤差が,メインローブでは 21.5%の誤差が,第一サイドローブでは 2.3%それぞれ誤差が確認された.特にメインローブでのエネルギー密度の違いが確認されたものの,図 10 より放射パターンはほぼ一致することが確認された。

### 3.3SPS 小型実証衛星でのビームフォーミングへの影響の検証

前節までの検証を踏まえ,現在のブレッドボードモデルの精度での SPS 小型実証衛星のビームフォーミングへの影響を検証する。

現在,JAXA では小型衛星を用いた SPS 技術実証実験の検証が進められている.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.その SPS 小型実証衛星のアレーアンテナ配列案を以下の図 11 に示す。

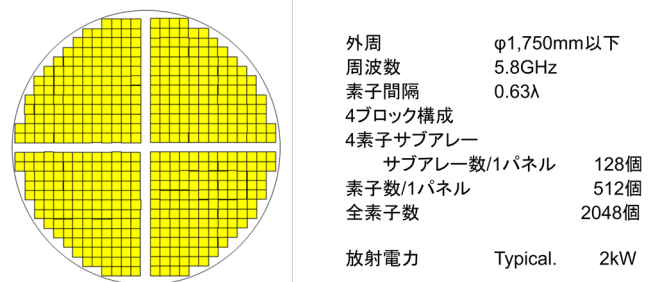


図 11 SPS 小型実証衛星のアレーアンテナ配列案

図 11 より,送電周波数は ISM バンドである 5.8GHz を想定している。

一般に,方形 2 次元配列のフェーズドアレーにおける各素子の位相誤差とビーム方向誤差は以下の(1)式で表される。

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{4\sigma^2}{N \left( \frac{\pi D}{\lambda} \cos \theta_0 \right)^2} \quad (1)$$

ここで, $\sigma_{\theta}$ :ビーム方向誤差[deg.], $\theta_0$ :ビーム掃引方向[deg.], $N$ :アンテナの全素子数[個], $D$ :アンテナ開口径[m], $\sigma$ :各素子の位相誤差[deg.], $\lambda$ :波長[m]である。

図 11 より,外周が 1.75[m]なので,円形に配列されたアンテナの開口径が  $D=0.55$ [m]なので,これを方形に近似させると  $D=0.49$ [m], さらに,円形サブアレーアンテナの全素子数が 2048 個であるから,これを方形に近似させれば,その一片は 45.25[個]になるから, $N=2047.56$ [個]となる.

以下の表 14 に今回の測定で観測された位相誤差平均を示す.

表 14 位相誤差平均

ビーム掃引角 [deg.]	位相誤差 [deg.]
0°前	19.2
0°後	14.9
+5°前	27.6
+5°後	11.5

表 14 より、各々のビーム掃引に対する誤差平均のうち最も特性が悪かった+5°での位相誤差平均を  $\varphi$ [deg.]とすれば,各々のパラメータは  $N=2047.56$ [個],  $D=0.49$ [m],  $\sigma=27.6$ [rms],  $\theta_0=0$ [deg.],  $5$ [deg.],  $\lambda=0.052$ [m] となり,これらを(1)式に代入することでビーム方向誤差  $\Delta\theta$ [deg.]を求める.

以下の表 15 に,現在のブレッドボードモデルの精度を想定した SPS 小型実証衛星でのビーム誤差を示す.

表 15 SPS 小型実証衛星でのビーム誤差

ビーム掃引方向 $\theta_0$ [deg.]	ビーム方向誤差 $\Delta\theta$ [deg.]
0.00	0.04
5.00	0.04

表 15 より,SPS 小型実証衛星から地上への送電距離を,仮に現在検討されている準回帰軌道の 370[km]とすれば,受信点誤差[m]は以下の表 16 のように求まる.

表 16 SPS 小型実証衛星での受信点誤差

ビーム掃引方向 $\theta_0$ [deg.]	受信点誤差 [m]
0	264.83
5	265.84

表 16 より,現在のビーム指向精度では 270[m]程度の誤差を考慮して受信点を決定する必要があり,実験シークエンスとしては今後さらにビーム制御精度を向上させる必要があると考えられる.

#### 4. まとめ

本稿を通じて,当研究室で開発している衛星搭載実験用マイクロ波送電装置のブレッドボードモデルの位相補正によるビーム方向精度の向上効果を検証した.

これにより,各々のビーム掃引において,位相補正なしの場合とありの場合を比較することで,位相補正を加えれば主ビームの質が向上することが確認された.

さらに,実験結果から得られた位相誤差と振幅誤差をシミュレーション値に与えることにより,これらの誤差がアンテナのビームパターンおよびビームフォーミングに及ぼす影響が検証された.

今後の SPS 小型実証衛星での技術実証実験へ向け,現在のブレッドボードモデルのビーム制御精度をさらに向上させていく必要があると考えられる.

#### 5. 謝辞

近傍界測定装置の準備,校正,使用方法についてご助力頂いた京都大学の三谷准教授,ならびに篠原研究室の皆様に深く感謝致します.

#### 参考文献

- [1]「フェーズドアレーアンテナにおけるモノパルス差パターンのビーム方向に関する検討」:  
(著)大塚昌孝,千葉勇,片木孝至,鈴木龍彦  
電子情報通信学会論文誌. B, 通信 J82-B(3), 427-434, 1999-03-25
- [2]「Preliminary Experimental Results of Beam Steering Control Subsystem for Solar Power Satellite」:  
(著)T.Miyakawa,M.Yajima,S.Sasaki,T.Sasaki,Y.Homma, K.Namura  
Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS), 2012 IEEE MTT-S International,IEEE 10-11 May 2012
- [3]「平成 18 年度太陽光発電利用促進技術調査 成果報告書 別冊」:(財)USEF 平成 19 年 3 月