

## Study on High-Power Microwave Beam Forming with Transmitting System of SPORTS2.45\*

Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara, Takaaki Matsushima, Hiroshi Matsumoto  
Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

### Abstract

Phase-Controlled Magnetron (PCM) and Phase-and-Amplitude-Controlled Magnetron (PACM), which our research group have developed, are one of the strongest candidates for microwave generators in SPS microwave transmitting system, because they have advantages as follows: (1) higher DC-RF conversion efficiency, (2) much lower cost and (3) much smaller weight/power ratio than solid state devices. Based on these researches and developments, Space Power Radio Transmission System for 2.45GHz (SPORTS2.45) was installed in FY2000. A transmitting system of SPORTS2.45 consists of a phased array of the PCMs, therefore it is able to focus a high-power microwave beam on a receiving site. In the present study, we show unique demonstration experiments in the world on a high-power one-dimensional microwave beam forming with 4 PCMs of the SPORTS2.45 transmitting system.

We show experimental results on the microwave beam pattern formed by the SPORTS2.45 transmitting system through an array of four horn antennas. Side lobe levels of the experimental beam pattern were observed higher than the ideal side lobe levels computed by numerical simulations. The problem is caused by the phase stability of PCMs in the SPORTS2.45 transmitting system, the value of which is about  $\pm 5 \sim 20$  degrees. However, the phase stability has already been improved within about  $\pm 1.2$  degrees by the upgraded PCM/PACM developed in FY2003. Hence, an almost ideal beam pattern can be formed by upgrading the current PCMs of the SPORTS2.45 transmitting system.

Also, we show experimental results that we have succeeded in a directional control of the high-power microwave beam from the SPORTS2.45 transmitting system.

---

\* Presented at the 7<sup>th</sup> SPS Symposium, 16-17 September, 2004

# SPORTS2.45 送電システムを用いた 大電力マイクロ波ビーム形成に関する研究<sup>注1</sup>

三谷 友彦、篠原 真毅、松嶋 孝明、松本 紘（京都大学生存圏研究所）

611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

mitani@rish.kyoto-u.ac.jp

要旨：位相制御マグネトロン(PCM)及び位相振幅制御マグネトロン(PACM)は、高い変換効率・低コスト・単位出力あたりの重量が軽い等の長所を持ち、将来の SPS 実証試験衛星／商用衛星に搭載されるマイクロ波発振器の有力候補である。この PCM をフェーズドアレー化した高効率・大電力のマイクロ波送電が可能なシステムが、2000 年度に京都大学に導入された周波数 2.45GHz 帯の宇宙太陽発電所送受電システム (SPORTS2.45)である。本研究では、SPORTS2.45 送電システムを用いた、世界でも類のない大電力マイクロ波ビーム形成の実証実験を行った。ここでは PCM4 台をホーンアンテナアレーに接続した 1 次元マイクロ波ビーム形成実験について報告する。マイクロ波ビームパタンの実測結果は、計算機実験により得られるビームパタンに比べてサイドロープレベルの上昇が見られた。この原因は SPORTS2.45 の PCM の位相安定度が $\pm 5$ 度 $\sim 20$ 度程度と大きいためである。しかし、既に 2003 年度に開発された PCM/PACM は位相制御ループの高速化等により $\pm 1.2$ 度程度の位相安定度を達成しており、この最新型 PCM/PACM の改良部分を SPORTS2.45 の PCM に適用することにより、理論値に近いビームパタンを得ることができる。また、所望方向へのマイクロ波ビーム制御に関する実証実験に成功しており、その成果について示す。

## 1. はじめに

マグネトロンは電子管の一種であり、70%以上の高い変換効率・低コスト・マイクロ波出力 1W あたりの重量が軽量であるという長所から、SPS 実証試験衛星／商用衛星のマイクロ波送電システムにおけるマイクロ波発振器の有力候補の 1 つである。しかし、SPS 送電システムのマイクロ波出力を唯一のマイクロ波発振器で賄うことは事実上不可能であり、無数のマイクロ波発振器を用いた大規模なフェーズドアレー化によるマイクロ波ビーム制御が必須とされている。これに対してマグネトロンは、(a)同仕様であっても、周波数・出力電力の個体差が存在する、(b)発振時のマグネトロン温度に依存して周波数・出力電力が変化するという問題があるため、マグネトロンを SPS 送電システムに適応するには周波数・位相・出力電力を制御する必要がある。これらの課題を克服すべく、我々の研究グループでは、現在までに位相制御マグネトロン (Phase-Controlled Magnetron: PCM)<sup>[1]</sup> 及び位相振幅制御マグネトロン (Phase-and-Amplitude-Controlled Magnetron: PACM)<sup>[2]</sup>を開発し、PCM を用いたアクティブフェーズドアレーの研究<sup>[3]</sup>を行ってきた。

このような研究成果をもとに、宇宙太陽発電所送受電システム (Solar Power Radio Transmission System: SPORTS)<sup>[4]-[6]</sup>が京都大学に導入された。SPORTS には、2000 年度に導入された周波数 2.45GHz 帯の SPORTS2.45、及び 2001 年度に導入された周波数 5.8GHz 帯の SPORTS5.8 の 2 つのシステムがあり、いずれも PCM を送電システムのマイクロ波源とした大電力マイクロ波エネルギー送受電に関する実証実験を行うことができる世界でも類のないシステムである。

本報告では、SPORTS2.45 送電システムを用いた大電力マイクロ波ビーム形成に関する実証実験成果について示す。

## 2. PCM/PACM

<sup>注1</sup> 第 7 回 SPS シンポジウム、九州工業大学にて 2004 年 9 月 16、17 日開催

PCM はマグネトロンからの出力位相制御を可能とするシステムであり、過去には W. C. Brown により開発された例<sup>7)</sup>がある。Brown の PCM では、位相制御を達成するために、サーキュレータを通じてマグネトロンに基準信号を注入する注入同期法に加えて、マグネトロン永久磁石にコイルを装着し、コイル電流制御ループによってマグネトロン磁場を制御する手法を採用している。しかし、この手法ではコイル電流変化に対する周波数変動幅が小さいため、

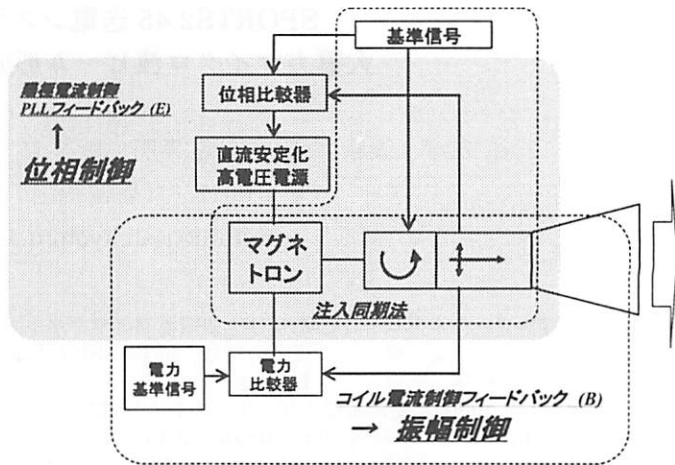


図 1 PCM/PACM の概略ブロック図

位相制御可能な周波数範囲が狭いという問題がある。そこで我々の研究グループでは、上述の注入同期法に加えてマグネトロンの陽極電流制御ループを構築することにより、位相制御可能な周波数範囲の広い位相制御システムを実現している。一方、マグネトロンの振幅制御に関しては、マグネトロン永久磁石にコイルを巻きつけ、コイル電流制御ループを構築することによりマグネトロンの磁場を制御し、振幅制御を達成している。我々の研究グループで開発された PCM/PACM の概略ブロック図を図 1 に示す。図 1 のうち、位相制御ループ部のみを組み込んだシステムが PCM であり、位相・振幅制御ループ部の両方を組み込んだシステムが PACM である。

ここで、PCM/PACM の位相精度を示す重要な指標として、位相安定度が挙げられる。位相安定度の乏しい PCM/PACM をフェーズドアレー化し、マイクロ波ビームを形成してしまうと、メインビーム幅の広がり、及びサイドローブレベルの上昇という問題が発生する。従って PCM/PACM は、SPS 送電システムに対して要求される位相安定度の目標値を満たす必要がある。ここでは位相安定度の目標値を±5 度と設定する。この値は、USEF/SSPS 専門委員会で検討されている SPS 実証試験衛星<sup>8)</sup>をモデルとし、電力収集効率 90%以上かつサイドローブレベルがメインローブに対して-30dB 以下という条件下のときに要求される位相安定度の値である。

この目標値に対して、我々のグループで開発された最新型の PCM/PACM<sup>12)</sup>は、制御ループ部のアナログ回路化による制御ループ高速化の実現により、位相安定度±1.2 度程度を既に達成している。このことから、PCM/PACM は SPS 実証試験衛星におけるマイクロ波発振器としての能力を十分に備えていると言える。

### 3. SPORTS2.45

図 2 に SPORTS2.45 の概要図を示す。SPORTS2.45 送電

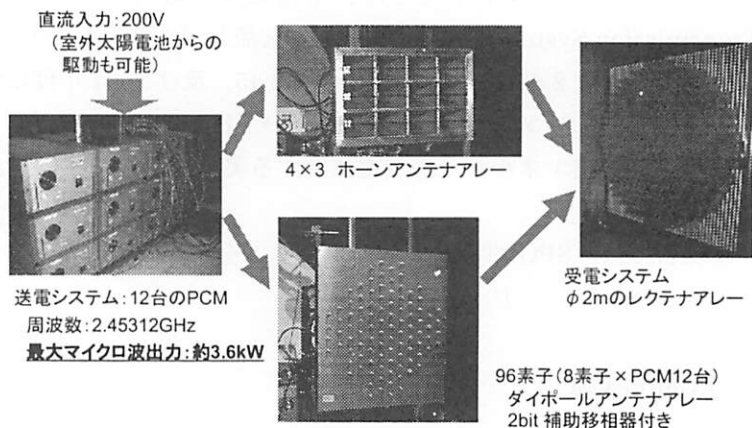


図 2 SPORTS2.45 の概要

システムは、12 台の PCM 及び送電アンテナアレーで構築される。PCM は直流 200V 入力で駆動し、太陽電池で発電される直流電力からも駆動できる。各 PCM の平均マイクロ波出力は約 300W であり、合計で最大 3.6kW のマイクロ波出力を得ることができる。送電アンテナアレーは、12 素子ホーンアンテナアレー、もしくは 96 素子ダイポールアンテナの 2 種類から選択されマイクロ波ビームが放射される。12 素子ホーンアンテナアレーは、PCM1 台からのマイクロ波出力をホーンアンテナ 1 素子に直結する構成である。素子数が少ないため、サイドローレベル抑制やビーム制御方向の角度分解能の点では劣るものの、PCM-アンテナ間の電力損失が少なく、高効率・大電力のマイクロ波ビームを形成することができる。一方、96 素子ダイポールアンテナは、PCM 1 台からのマイクロ波出力を 8 分配し、更に各アンテナ素子の直前に 2bit の補助移相器を設けている。これにより、PCM-アンテナ間においてある程度の電力伝送損失は伴うものの、サイドローレベルが抑制され、かつビーム制御方向の角度分解能の高い送電システムを構築することができる。送電システムから放射されるマイクロ波ビームは直径 2m の範囲に設置されたレクテナアレーにより受電され、マイクロ波から再変換された直流電力が得られる。

#### 4. 大電力マイクロ波ビーム形成実証実験の概要

図 3 に SPORTS2.45 送電システムを用いた大電力マイクロ波ビーム形成実証実験の概略図を示す。本実験では、4 台の PCM 及びホーンアンテナアレーを用いる。ホーンアンテナアレーは垂直方向 3 素子×水平方向 4 素子の長方形に配置されており、本実験では PCM からマイクロ波出力をホーンアンテナアレー中段の 4 素子に直結することにより、水平方向へのビーム制御が可能な 1 次元アンテナアレーを構築する。ホーンアンテナから 4.7m 離れた位置にはダイポールアンテナが設置されている。X-Y ポジショナを水平方向に稼動しながらダイポールアンテナで受電される電力をスペクトラムアナライザで測定することにより、水平方向のマイクロ波ビームパターンを測定する。測定範囲は送電アンテナの正面方向を 0m として、+2.00m~-2.00m であり、方位角に換算すると測定範囲は+23.1 度~-23.1 度となる。本実験は、京大生研研究所のマイクロ波エネルギー実験装置(METLAB)・電波暗室にて行われた。

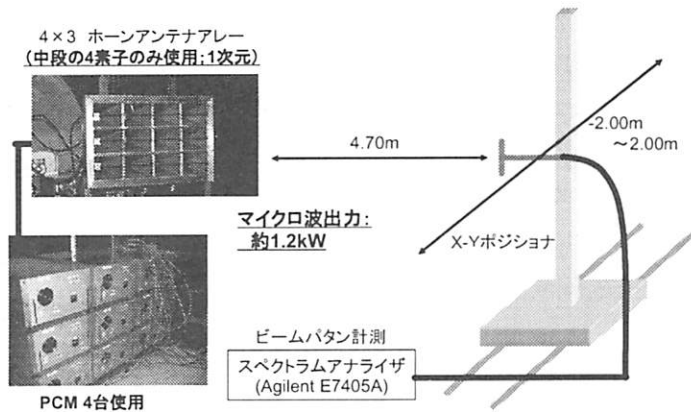


図 3 大電力マイクロ波ビーム形成実験概略図

#### 5. ビームパターン測定結果

図 3 に示す SPORTS2.45 送電システム構成において、マイクロ波ビームを正面方向に制御したときのビームパターン測定結果を図 4 のグラフ中の①で示す。図 4 の横軸は受電ダイポールアンテナの水平方向位置であり、縦軸はビームパターンのピーク値で規格化した相対電力強度である。また、図 4 のグラフ中に、今回の実験仕様と同条件でのビームパターンの計算機実験結果 (②~④) を併記する。

SPORTS2.45 PCM の各々の位相に時間変動がなく、位相安定度が理想状態であれば、図 4 中の③のビームパターンが得られる。しかし、実際には PCM の位相は時間変動するため、実測結果

である①のパタンは③のパタンに比べてサイドローブが上昇する結果となる。

ここで、図 5 に SPORTS2.45 PCM の位相安定度測定結果の一例を示す。このグラフは、位相制御ループ内のミキサ出力電圧の時間変化を示したものである。ミキサ出力電圧は、マグネトロン出力波形-基準信号波形間の位相比較結果に相当し、ミキサ出力電圧の時間変動から PCM の位相安定度を知ることができる。SPORTS 2.45 の PCM は図 5 に示すような位相の時間変動が見られ、各々の PCM に対して位相安定度を測定したところ  $\pm 5 \sim 20$  度となった。

この PCM 位相安定度測定結果をマイクロ波ビームパタンの計算機実験に反映させたものが、図 4 の②である。図 4 の②は位相変動を  $\pm 20$  度としたときのビームパタンであり、実測結果である図 4 の①のビームパタンに近づくことがわかる。従って、実測結果に見られるサイドローブ上昇は位相安定度の問題であると言える。

位相安定度に関しては、第 2 節で述べたように位相安定度の目標値を  $\pm 5$  度と設定している。ここで、図 4 の④は位相変動を  $\pm 5$  度としたときのビームパタンの計算機実験結果であり、この程度の位相安定度が得られれば理想的なビームパタンである図 4 の③と遜色のないビームパタンが得られる。今回使用した SPORTS

2.45 の各 PCM の位相安定度が十分でない主な原因は、位相制御ループの応答速度が十分でないことが挙げられる。しかしこの問題については、2003 年度に開発された最新の PCM/PACM<sup>[2]</sup> の改良部分である位相制御ループの高速化を施すことにより克服できる。実際に、最新の PCM/PACM は  $\pm 1.2$  度の位相安定度が得られている。

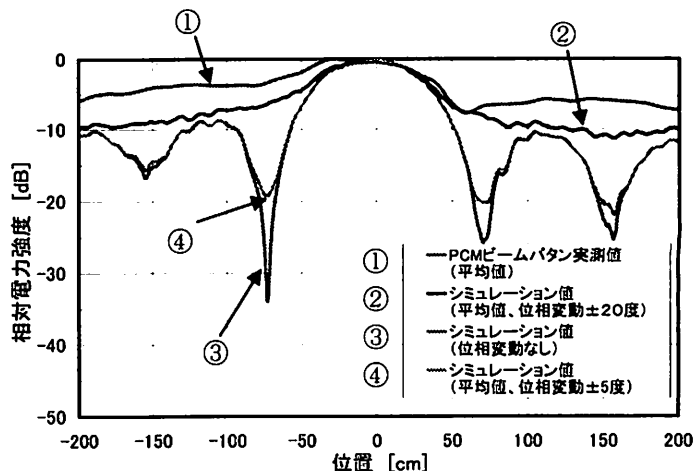


図 4 マイクロ波ビームパタン測定結果 (正面方向)

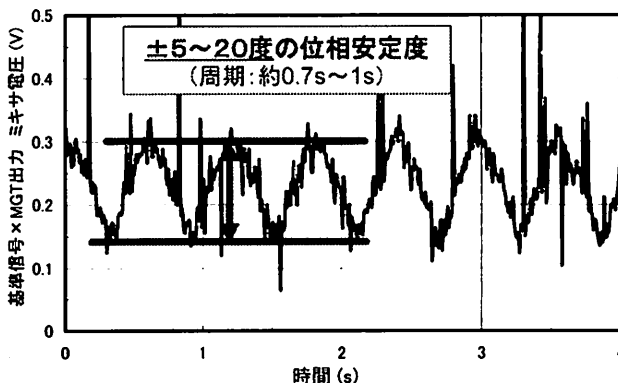


図 5 SPORTS2.45 PCM の位相安定度

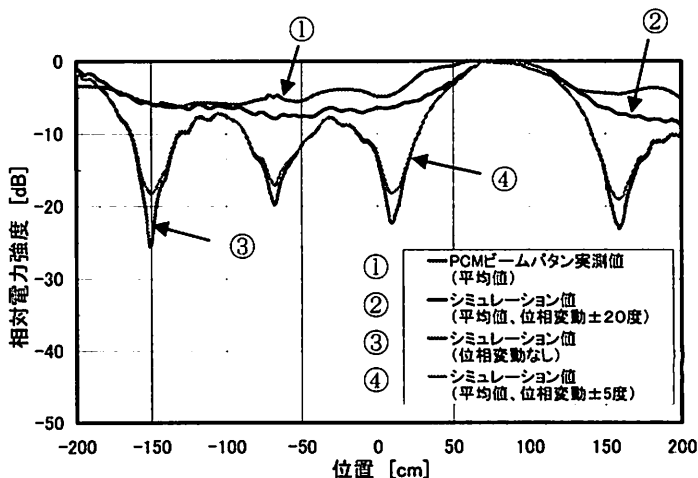


図 6 マイクロ波ビームパタン測定結果 (8.6度方向)

次に、マイクロ波ビーム方向を 8.6 度方向に制御したときのビームパタン実測結果を図 6 の①に示す。正面方向の実測結果と同様に、位相安定度に起因するサイドローブレベルの上昇が見られるものの、所望のビーム方向に制御されていることがわかる。サイドローブレベルに関しては、先ほどと同様に、SPORTS2.45 PCM の位相安定度を±5 度程度まで改善することにより、図 6 の④に示す程度のビームパタンとなり、理想状態である図 6 の③とほぼ同様のビームパタンが得られる。

## 6. おわりに

本研究では、SPORTS2.45 送電システムを用いた世界でも類のない大電力マイクロ波ビーム形成実験を行い、PCM4 台による 1 次元マイクロ波ビームの形成及びビーム方向制御に成功した。実測ビームパタンは、サイドローブレベルの上昇が見られたが、これは位相安定度が不十分であることに起因するものであり、最新型 PCM/PACM の改良部分である位相制御ループの高速化を施すことにより、±5 度以内の位相安定度は十分達成可能である。

今後は、実際に SPORTS2.45 PCM の改良による位相安定度±5 度以内の達成に取り組むとともに、12 台の PCM を用いた 2 次元方向制御可能な大電力マイクロ波ビーム形成実験、及び SPORTS2.45 送電アンテナのもう一つのオプションである送電ダイポールアンテナアレーを用いたマイクロ波ビーム形成実験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 篠原 真毅、三谷 友彦、松本 紘、“位相制御型マグネトロンの開発研究”、信学論(C)、Vol.J84-C No.3、pp.199-206、2001 年 3 月
- [2] 加藤 紳一郎、篠原 真毅、松本 紘、“位相振幅制御マグネトロンの開発研究”、第 6 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨集 pp.81-86、静岡大学、2003 年 10 月
- [3] 篠原 真毅、藤原 淳輔、三谷 友彦、松本 紘、橋本 弘藏、“位相制御マグネトロンを用いたマイクロ波ビーム制御システムの開発研究”、第 2 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨集 pp.57-61、京都大学、1999 年 11 月
- [4] 篠原 真毅、松本 紘、“宇宙太陽発電所發送受電システム”、第 3 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨集 pp.65-69、北海道大学、2000 年 10 月
- [5] 篠原 真毅、松本 紘、“マイクロ波送電システムの実現可能性”、第 4 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨集 pp.72-75、慶応義塾大学、2001 年 10 月
- [6] 篠原 真毅、松本 紘、“マイクロ波送電の実現可能性 II -京大の取り組みとロードマップ-”、第 5 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨集 pp.113-118、神戸大学、2002 年 11 月
- [7] W. C. Brown, “The SPS transmitter designed around the magnetron directional amplifier”, Space Power, vol. 7, no.1, pp.37-49, 1988
- [8] 佐々木 進、USEF/SSPS 専門委員会、USEF、“SSPS 実証実験システムの技術的な研究課題”、第 5 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨集 pp.131-136、神戸大学、2002 年 11 月