

マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを用いた ビーム方向制御に関する研究

石川 峻樹[†] 吉野 純樹[†] 久保 勇太[†] 篠原 真毅[†]

[†] 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: [†] {i-takaki, junki_yoshino, y-kubo, shino}@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし 宇宙太陽光発電所(SPS)を実現するためには、高精度な送電マイクロ波のビーム制御を行う必要がある。京都大学では、宇宙太陽光発電に向けたマイクロ波無線電力伝送に関する研究のために、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを導入し、ビーム制御技術に関する研究を行っている。本論文では、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムに関して、測定実験及びシミュレーションを行った。各結果を比較、評価したところ、これらの結果は非常によく一致しており、本システムを用いることで、より高度なビーム制御の実験を行うことが可能であることが示された。

キーワード フェーズドアレーアンテナ, ビームフォーミング

Study on Beam Forming with Phased Array System for Microwave Power Transmission

Takaki ISHIKAWA[†] Junki YOSHINO[†] Yuta KUBO[†] and Naoki SHINOHARA[†]

[†] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji-shi, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: [†] {i-takaki, junki_yoshino, y-kubo, shino}@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract We have to achieve high beam direction control accuracy, in order to realize a solar power satellite/station (SPS). In Kyoto University, we study microwave power transmission (MPT) and solar power satellite (SPS) MPT system. We have an advanced phased array system to make experiments on beam forming with phased array. The advanced phased array system has 256 antenna elements and 5-bit digital phase shifters. We measured and simulated the radiation patterns of the advanced phased array system and compared the measurement and simulation results. As a result of these comparisons, the measured radiation patterns correspond with the simulated radiation pattern.

Keyword Phased array antenna, Beam forming

1. 研究背景

宇宙太陽発電所(Solar Power Satellite / Station: SPS)とは、静止衛星軌道に非常に大型の太陽発電衛星を建設し、発電した電力をマイクロ波無線電力伝送技術あるいはその他の無線電力伝送技術を用いることで、宇宙において発電した電力を地上で利用するという構想である[1]。宇宙空間では、構造物を固定することが困難であるため、送電アンテナの向きは絶えず変化することとなり、また、36000 km 離れた直径数 km の受電設備に送電マイクロ波の電力を集中させる必要があることから、非常に高精度かつ高速なビーム制御を行う必要がある。そのため、送電用のアンテナとしては、フェーズドアレーアンテナを用いることが検討されている。フェーズドアレーアンテナとは、多数のアンテナ素子から構成され、各アンテナ素子からの放射の振幅と位相を制御することにより、任意のビームの形成

が可能なアンテナである。そのため、フェーズドアレーアンテナはビーム方向制御を、アンテナの物理的な向きの制御ではなく、振幅や位相の制御といった電気的な制御によって行えるため、高精度かつ高速な制御が可能であり、SPS に適したアンテナである。

京都大学生存圏研究所では、フェーズドアレーアンテナを用いた無線電力伝送に関する実験を行うことを目的とし、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを導入した。表1はシステムの構成を表しており、図1はシステムの外観を表している。本システムでは、各アンテナ素子がそれぞれに5 bit デジタル移相器を持っており、放射位相を個別に制御することが可能である。一方で、各アンテナ素子からの出力は個別に制御を行うことはできず、すべてのアンテナ素子が一様な放射電力となる。本論文では高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを用いたビー

ム制御に関する実験及びシミュレーションの結果について述べる。

表 1 システムの構成

周波数	5.8 GHz
偏波	右旋円偏波
素子数	256
移相器	5 bit デジタル移相器
合計マイクロ波出力	最大 1.9 kW



図 1 システムの外観

2. 測定実験及びシミュレーションの概要

京大生生存圏研究所の高度マイクロ波電力伝送実験棟（Advanced Microwave Energy Transmission Laboratory: A-METLAB）において、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレイシステムを用いたアンテナパターンの測定を行った。測定は、図 2 のように、フェーズドアレイと測定用アンテナを正対させた状態で配置した。このときフェーズドアレイはアンテナ面の中心が A-METLAB のターンテーブルの中心に重なるように配置し、測定用アンテナは保持用のラックに固定した。ただし、測定用アンテナの中心の高さがフェーズドアレイの中心の高さと等しくなるように、測定用アンテナを設置した。以上のような設定において、ターンテーブルを回転させた時の測定アンテナにおける受電電力を測定することで、アンテナパターンの測定を行った。また、送受電アンテナ間の距離は、レーザー測距計を用いて測定を行ったところ、6.45 m となる。このとき、フェーズドアレイの一边の大きさ D が約 80 cm、波長 λ が約 5.17 cm なので、 $(2D^2)/\lambda$ の値を計算すると約 24.8 m となることから、測定アンテナが

フェーズドアレイのフレネル領域にあることがわかる。そのため、測定されたアンテナパターンは、遠方界のアンテナパターンとは異なるパターンとなる。

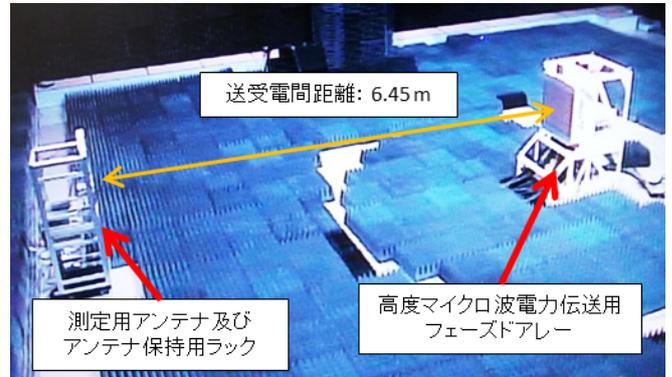


図 2 実験概要

2.1. 初期校正について

フェーズドアレイのアンテナパターンの測定を行う前に、各移相器の初期校正を行った。校正の手法には素子電界ベクトル回転法（Rotating element Electric field Vector method: REV 法）を用いた[2]。図 3 に REV 法のイメージを示す。REV 法は、フェーズドアレイの移相器の移相量を変化させたときの、合成電界の大きさの変化を測定することで行う。このとき、合成電界の大きさは図 4 に示すように、移相量の変化に対して、正弦波を描くように変化することから、位相の値を推定することが出来る。以上の操作を各アンテナ素子の移相器に対して行うことで、フェーズドアレイの移相器の校正を行うことが出来る。

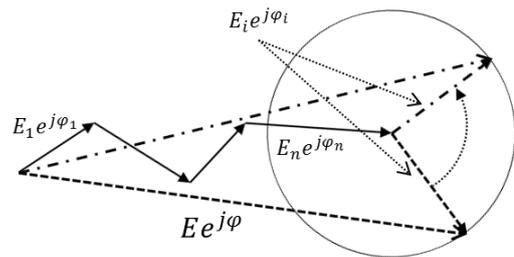


図 3 REV 法イメージ

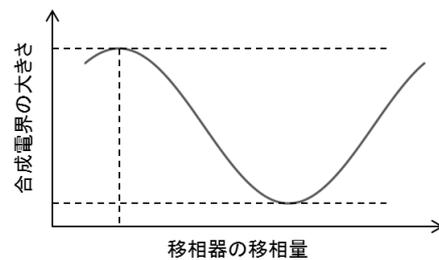


図 4 移相量の変化による合成電界の大きさの変化

本研究では、フェーズドアレーの基準信号と測定用アンテナにおいて受信した信号の強度を比較することで、REV法による較正を行った。このとき得られた結果を図5に示した。ただし、代表として素子番号が8, 125, 195の移相器の結果のみを示している。また、図5の縦軸が基準信号と受信信号の電界強度の差、横軸が移相器の移相量を示している。図5より、移相量を変化させることで、合成電界の大きさが正弦波を描くように変化していることが確認できる。この結果から、フェーズドアレーの移相器の較正を行い、得られた較正データを用いて、アンテナパターンの測定を行うこととした。

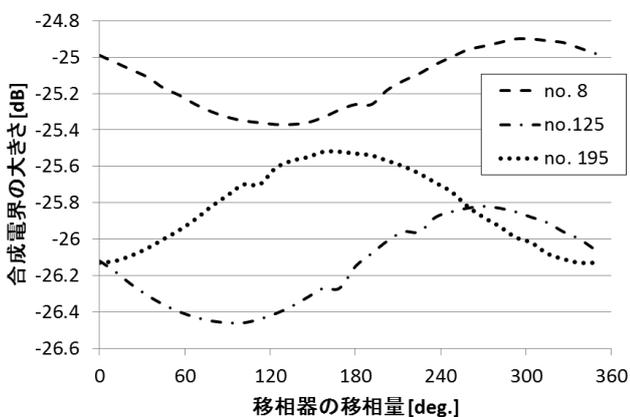


図5 REV法の測定結果

2.2. 位相測定点が3点の場合

本論文では、アンテナパターンの測定との比較を行うために、シミュレーションによる検討も行った。今回の検討では、電界合成法及びHFSSを用いたシミュレーションを行った。

電界合成法は、各アンテナ素子からの放射によって作られる電界を個別に計算し、得られた電界の値を、位相を考慮して重ね合わせることで、合成電界の計算を行う手法である。合成電界を複数の点で計算することにより、フェーズドアレーからの放射されたマイクロ波の電力密度分布を計算することが可能となる。この手法は、各アンテナ素子からの放射を、理論式を用いて計算を行うため、計算が比較的容易であるという利点がある。一方で、各アンテナからの放射を個別に計算することから、アンテナ間相互結合をはじめとした、複雑な電磁界の現象を再現することができず、計算精度はあまり高くないと考えられる。

HFSSは、3次元のCADによりデザインしたモデルを有限要素法により解析を行うことで、電磁界の計算を行う。3次元有限要素法の電磁界シミュレーターである。作成したモデルを含んだ解析空間中の電磁界をマクスウェル方程式に従って解析を行うために、比較

的精度よく解析を行うことが出来る。一方で、大規模なアンテナの計算を行う場合などには、計算を行うために非常に多くのメモリが必要となり、また、計算時間が電界合成法と比較して、非常に長くなるといった欠点もある。

以上の2種類のシミュレーションの結果を、実際の測定により得られた結果と比較を行うことで、システム及びREV法による較正の精度や、各シミュレーションにおける電磁界の計算の精度の評価を行っていく。また、各シミュレーションにおける測定点の位置は、実際の測定実験と同様に、フェーズドアレーのアンテナ面の中心と同じ高さの水平面上の、半径が6.45mの円弧上にあるものとし、計算を行った。

3. 測定実験及びシミュレーションの結果

アンテナパターンの測定の結果は図6となった。図6は、フェーズドアレーのメインビームの方向を -40° から 40° まで 10° ごとに変化させた場合のアンテナパターンを示しており、縦軸が電力強度、横軸が角度を表している。ただし、電力強度はメインビームの方向を 0° とした場合のパターンにおいて、ピークの値が0dBとなるように規格化した値である。図6より、メインビームの角度の大きさが大きくなるほど、電力強度が低下している傾向がみられる。これはアンテナ素子単体のエレメントパターンによるものと考えられる。メインビームの角度が -10° と 10° の場合では、ピークの大きさがほぼ等しくなっているが、メインビームの角度の大きさが 20° 以上となる領域では、メインビームの角度が正の場合と負の場合でピークの値が大きく異なっていることが確認できる。このことは、フェーズドアレーがターンテーブルの中央に配置されていない、フェーズドアレーと測定用アンテナが正確に正対していないことが原因である可能性が考えられる。

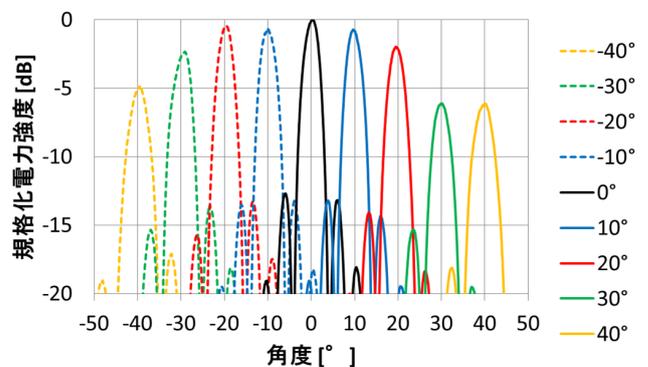


図6 測定実験の結果

電界合成法によるシミュレーションの結果は図 7 となった。測定実験の場合と同様に、フェーズドアレーのメインビームの方向を -40° から 40° まで 10° ごとに変化させた場合のアンテナパターンを示した。ただし、電界強度は電界合成法でメインビームの方向を 0° とした場合のパターンにおいて、ピークの値が 0 dB となるように規格化した値である。全体的な傾向としては、実験と同様に、アンテナ素子単体のエレメントパターンによると考えられるピークの低下がみられる。一方で、メインビームの角度が正の場合と負の場合で、対称になっており、測定実験の結果とは異なった傾向を示している。

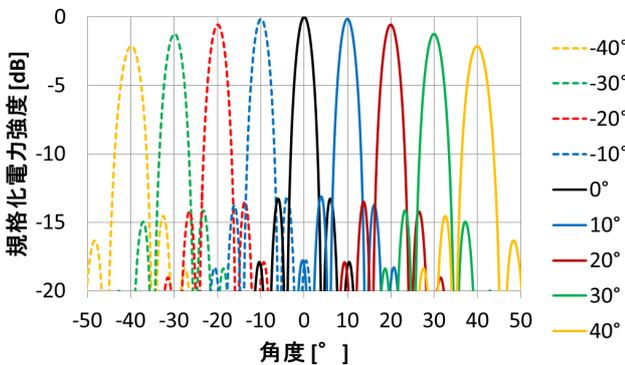


図 7 電界合成法によるシミュレーションの結果

HFSS によるシミュレーションの結果は図 8 となった。測定実験の場合と同様に、フェーズドアレーのメインビームの方向を -40° から 40° まで 10° ごとに変化させた場合のアンテナパターンを示した。ただし、電界強度は HFSS でメインビームの方向を 0° とした場合のパターンにおいて、ピークの値が 0 dB となるように規格化した値である。全体的な傾向としては、測定実験および電界合成法の結果と同様に、メインビームの角度の大きさが大きくなるほどに、ピークの値が低下している様子が確認出来る。一方で、ビームの角度の大きさが 20° の場合と 30° の場合では、非常に大きなピークの値の変動がみられる。同様の傾向は、測定実験の結果にも表れている。しかし、電界合成法の結果ではピークの値の急激な低下が表れていないことから、ビームの角度の大きさを大きくする場合には、電界合成法では精度のよい検討が出来ないと考えられる。また、HFSS によるシミュレーションでは、メインビームの方向が正の場合と負の場合を比較すると、正の場合の方が負の場合よりも、少しではあるが低下している様子が確認できる。そのため、フェーズドアレーや測定アンテナの配置以外の要因がある可能性も考えられるため、今後詳細な検討を行う必要がある。

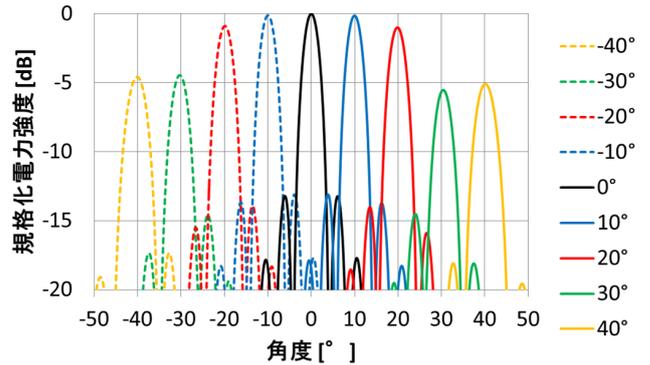


図 8 HFSS によるシミュレーションの結果

図 9, 図 10, 図 11 は、測定実験、電界合成法、HFSS のそれぞれの結果について比較したものである。ただし、図 9 はメインビームの角度が 0° の場合、図 10 は 20° の場合、図 11 は 40° の場合の値である。図より、測定実験、電界合成法、HFSS のいずれの結果についても、サイドローブやヌル点の存在する角度に関しては非常によく一致していることが確認出来る。ただし、メインローブやサイドローブのピークの値に関しては、測定実験の結果と HFSS の結果は比較的良い一致を示しているのに対して、電界合成法の結果は、角度の大きさが大きくなるにつれ、差が大きくなる事が確認できる。このことから、電界合成法を用いたシミュレーションを行う場合は、ビームの角度が大きい場合には、ビーム強度の誤差が大きくなることに注意をする必要があるといえる。

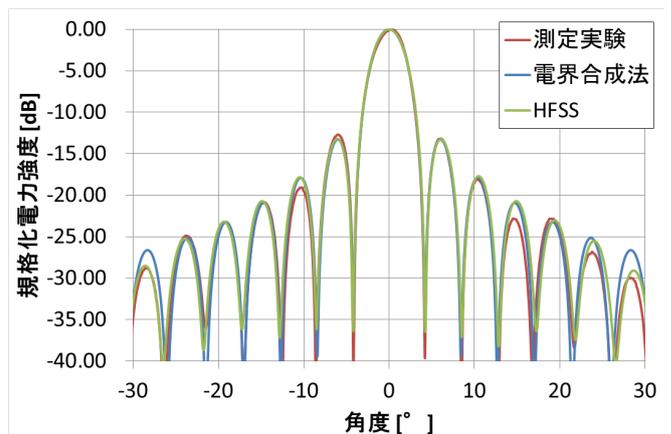


図 9 メインビームの角度が 0° の場合の結果比較

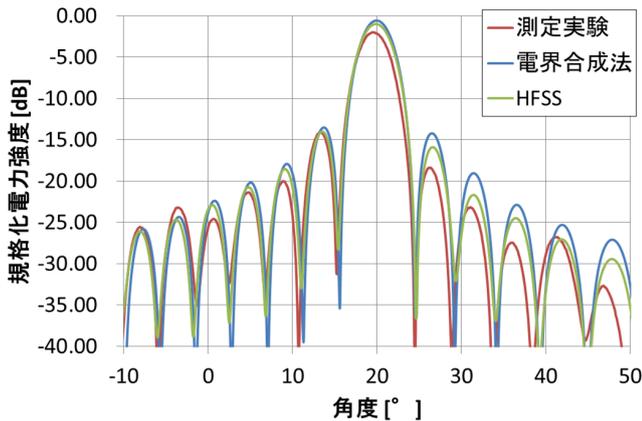


図 10 メインビームの角度が 20° の場合の結果比較

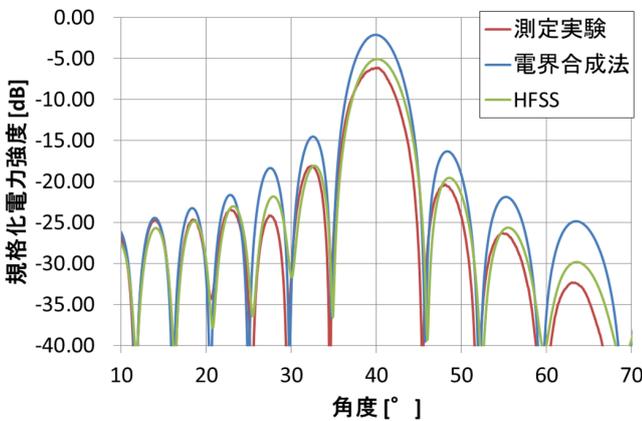


図 11 メインビームの角度が 40° の場合の結果比較

4. まとめと今後の予定

今回は、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを用いた、測定実験と、電界合成法及び HFSS によるシミュレーションの比較を行った。測定については、REV 法による初期較正を行って、得られた構成データを使用してメインビームの方向制御を行った。測定及びシミュレーションの結果を比較したところ、メインローブ、サイドローブ、ヌル点の位置については非常によく一致しており、REV 法による較正や、各シミュレーションが精度良く行えていることが確認出来る。一方で、測定結果はシミュレーションと異なり、メインビームの角度を正の方向に向けた場合と負の方向に向けた場合で、大きく異なる傾向が表れていた。これはフェーズドアレー及び測定用アンテナが正確に配置できていなかった可能性が考えられる。一方で、HFSS の場合にもわずかではあるがピークの値に差が生じているため、今後はより詳細な検討を行う必要がある。また、電界合成法については、ビームの角度が 0° に近い領域では精度よく電力強度の計算が行えているが、ビームの角度が大きくなるにつれて、

測定実験や HFSS との誤差も大きくなる傾向が見られた。そのため、電界合成法を用いてシミュレーションを行う場合にはビームの角度を小さくする必要があることが分かる。また今後は、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーシステムを用いることで、様々なビームフォーミングに関する実験を行っていく。

文 献

- [1] P. E. Glaser, "Power from the Sun: Its Future," *Science*, vol.162, no.2856, pp.857-886, 1968.
- [2] 真野清司, 片木考至, "フェイズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法—素子電界ベクトル回転法—," *信学論 (B)*, vol.J65-B, no.5, pp.555-560, 1982.