

マイクロ波エネルギー伝送に関する研究

本間 幸洋[†] 佐々木 拓郎[†] 篠原 真毅[‡]

[†] 三菱電機株式会社 〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

[‡] 京大大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: [†] { Homma.Yukihiko@df, Sasaki.Takuro@dn }.MitsubishiElectric.co.jp
[‡] shino@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし 高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレー・受電レクテナシステムは、京都大学で共同利用が始まっている。本装置は、宇宙太陽光発電をはじめとしたマイクロ波エネルギー伝送に関する様々な実験、研究・開発において、高いポテンシャルを持っている。今回、送電部を用いてマイクロ波ビームの制御技術を実験する手法や、デモンストレーションの例について検討を行った。これらの検討結果について報告を行う。

キーワード 宇宙太陽光発電、無線電力伝送、フェーズドアレー、レトロディレクティブ

Study of the Microwave Energy Transmission

Yukihiko HOMMA[†] Takuro SASAKI[†] Naoki SHINOHARA[‡]

[†] Mitsubishi Electric Corporation 8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661 Japan

[‡] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasyo, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

E-mail: [†] { Homma.Yukihiko@df, Sasaki.Takuro@dn }.MitsubishiElectric.co.jp
[‡] shino@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract New Phased Array and Rectenna Array Systems is available for researchers through the inter-universities collaboration in Kyoto University. The systems are developed for the Microwave Energy Transmission-test facility with several useful characteristics and are very helpful in research on Space Solar Power Systems or Microwave Energy Transmission. In this paper, we describe how to use for experiments on our studies in this field and introduce a demonstration of SSPS.

Keyword Space Solar Power Systems, Wireless power transmission, Phased array antenna, Retro-directive system

1. はじめに

アクティブフェーズドアレーは、可搬性に優れた小規模なアンテナを複数配置することで大型化が可能、設置時の誤差や時々変化する変形等の影響を位相制御により補正することができ、また、指定した方向に正確にマイクロ波を照射できる、という特長がある。これらの特長から、マイクロ波によるエネルギー伝送のキー技術として大きく期待されている。

京都大学では、2010年度に、高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレー・受電レクテナシステムを導入し、2011年度から共同利用を開始している。このシステムの高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレー（以降、送電部と呼ぶ）は、宇宙太陽光発電（SSPS: Space Solar Power Systems）や地上無線電力伝送などの、マイクロ波によるエネルギー伝送の研究開発を行うために、様々な工夫がなされており、この分野における研究用装置として、高いポテンシャルを持っている。

今回、これらの特長を有効に活用して、エネルギー伝送におけるキー技術の一つである送電マイクロ波のビーム制御技術の検討、研究を行った。

2. 高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーについて

2.1. 構成と主要機能・性能

図1に送電部とビーム制御装置のシステムブロック図を示す。また、表1に送電部の主要性能を示す。

送電部はフェーズドアレイアンテナとビーム制御装置（送電部側）、マイクロ波増幅器からの熱を排熱する冷却装置などで構成される。また、ビーム制御装置は、送電部側にアンテナ制御装置（ACU）やパイロット信号受信アンテナ、追尾受信機などが、マイクロ波が照射される受電部側には、5.8GHzの送電マイクロ波のモニタアンテナやパイロット信号送信アンテナなどで構成されている。

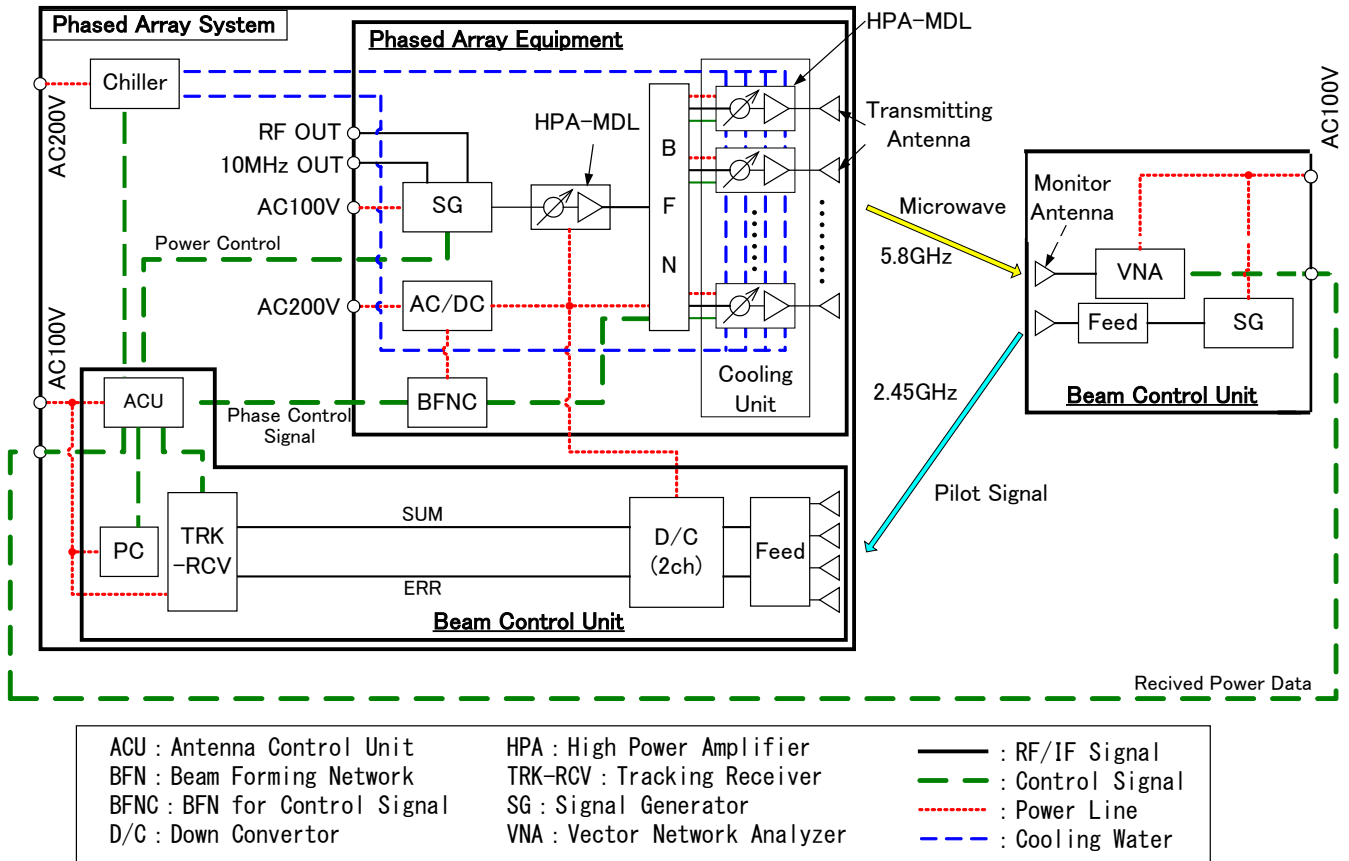


図 1: システムブロック図

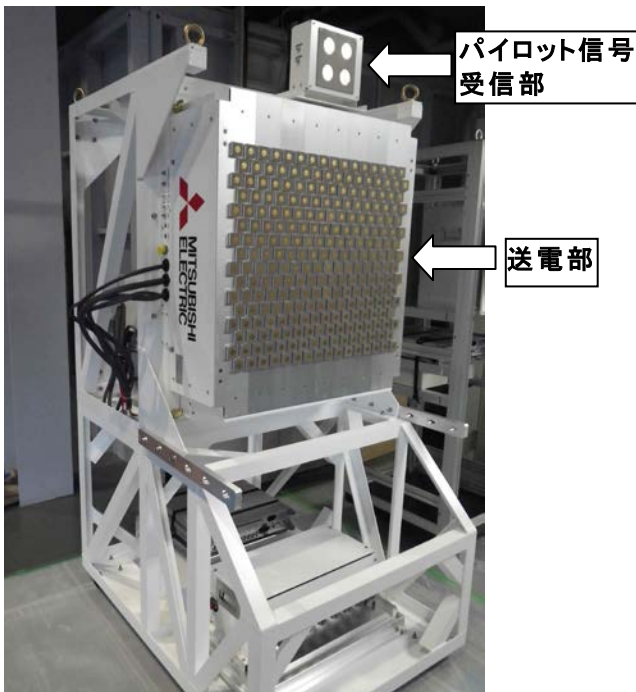


図 2: 送電部（垂直設置）の外観

本フェーズドアレーアンテナでは、マイクロ波発振器（SG）が出力する小電力のマイクロ波を HPA-MDL 内の電力増幅器で増幅し、さらに HPA-MDL 内の移相

器を制御することで所望の励振位相分布を実現することで、指定された方向に大電力の送電マイクロ波を送電する。表 1 に示すように、256 個の励振位相を決定する方法を複数備えており、次節で説明する。

表 1: 送電部主要性能

項目	送電部仕様
1 使用周波数	5.8GHz(右旋円偏波)
2 システム構成	256 素子アクティブフェーズドアレーアンテナ
3 送電出力	1.5kW以上(最大 1.9kW程度)
4 マイクロ波増幅器	GaN HEMT F 級増幅器(出力:7W以上, 電力付加効率:70.5%)
5 送電部総合効率	40%以上(最大 42.3%程度)
6 移相器	MMIC 5bit 移相器
7 ビーム制御に関わる機能	REV 法、振幅モノパルス追尾、ステップラック追尾 など
8 ビーム制御の外部インタフェース	・スクリプトファイルによる制御 ・近傍界測定装置との制御インタフェース
9 連続運転時間	連続 8 時間以上(水冷による安定動作)
10 設置	水平接地、垂直設置可能
11 交換性	HPA-MDL、及びアンテナ素子は付け替え可能。
12 付帯設備	・故障診断装置(サーモグラフィ) ・ビーム指向方向検出装置 など

2.2. ビーム制御に関する機能

送電部は、ビーム制御に関する実験や研究のために、REV法アルゴリズムと、パイロット信号を用いたソフトウェア・レトロディレクティブ方式（振幅モノパルス追尾）やステップトラック追尾を用いたビーム方向制御の機能を搭載している。これらは衛星通信などで実績があるビーム制御方式である。

REV法のアルゴリズム：(a)標準型REV法（合成電界の振幅のみを用いるREV法）[1]、(b)複素数型REV法（合成電界の振幅・位相を用いるREV法）[2]、(c)サブアレー型REV法（素子単位ではなく、適当なサブアレー単位実施するREV法）の3種類のREV法アルゴリズムを備えている。

振幅モノパルス追尾：パイロット信号が到来する方向検知して、その方向にマイクロ波ビームを指向させるソフトウェア・レトロディレクティブ機能である。

ステップトラック追尾：送電マイクロ波ビームを小幅走査した時の受電電力のレベル差から受電アンテナの方向を推定し、ビーム方向を制御する機能である。

送電部にはこれらの機能が搭載されており、SSPS等のフェーズドアレーアンテナを用いたマイクロ波エネルギー伝送の分野における、位相補正の方式やビーム方向制御等の制御技術の研究開発に活用できると考えている。

2.3. 送電部のビーム制御系の動作

図3に送電部のビーム制御のブロック図を示す。送電部の送電マイクロ波ビームは、大きく分けてビーム方向の指向指令（図3の①～⑤）と各移相器に対する位相指令（図3の⑥）の2つで制御が可能である。

①は図1のPCから指向指令を入力することで、マニュアルでビーム方向を指定して指向させることができる。②、及び③は、振幅モノパルス追尾やステップトラック追尾を実施しているときに、それぞれの追尾アルゴリズムが指向指令を演算して、ビームを指向させる。④は、送電部のACU（アンテナ制御装置）と外部装置（近傍界測定装置の制御装置）を接続し、この装置からの指向指令を入力することで、外部装置と送電部を連動させてビームを指向させる。

また、⑤及び⑥は、送電部のACUと外部計算機をRS422インタフェースで接続し、指向指令や位相指令をスクリプトファイルの形で送信することによりビーム制御を行う。

①～⑤のケースで指向指令が入力された場合は、自動的に指向指令を各移相器への位相指令に変換して、各移相器の位相が設定される。⑦や⑧で位相指令が得られた後に、⑨でREV法の結果の補正が、また、⑩でも更なる位相指令の補正が可能である。⑩は、例えば、

SSPSなどで問題となる複数のフェーズドアレーアンテナの送電部を用いたシステムの検討を行うために、送電部のアンテナ面において機械的な段差が発生した場合の位相誤差を模擬した位相指令を加算して試験を行う、などの使い方が考えられる。

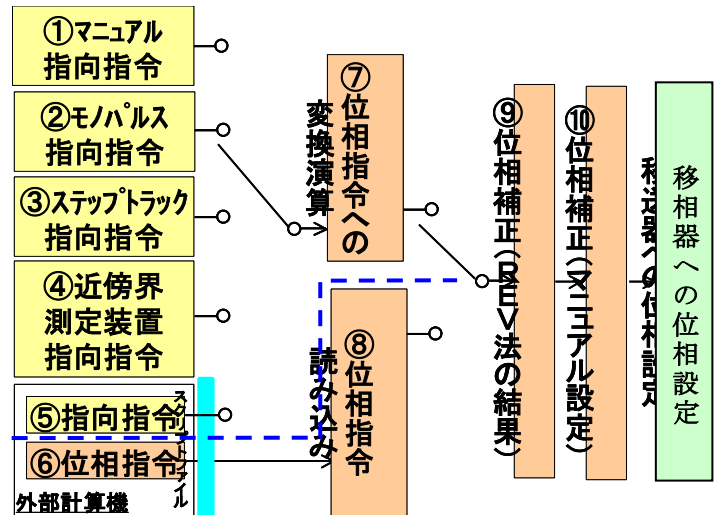


図3: 送電部のビーム制御のブロック図

3. 応用例

3.1. 宇宙太陽光発電のデモンストレーション

本送電部は、各移相器の位相を制御することで図4のように、AZ面には広い幅のビームを、EL面には狭い幅のビームを形成することができる。

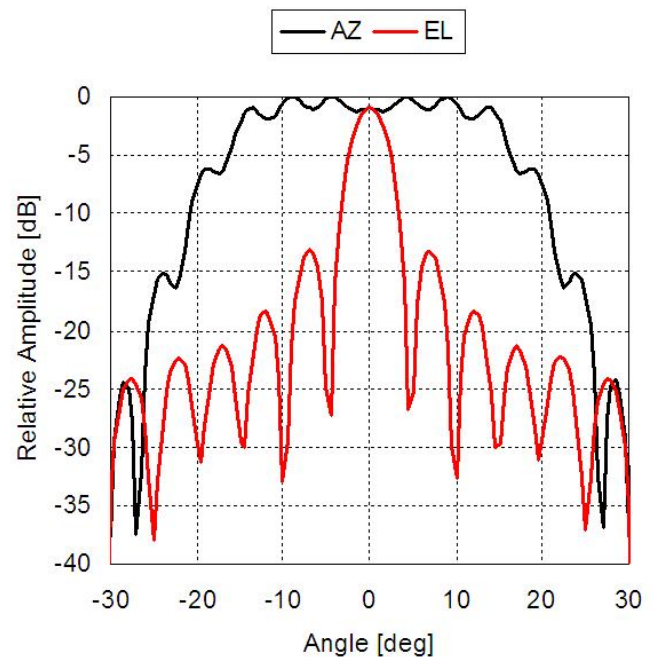


図4: 位相制御によるビーム形成の一例（計算値）

このようなビーム制御の機能や、フェーズドアレーアンテナの特徴である瞬時のビーム切り替えの機能を

使って、SSPS をイメージしたデモンストレーションを実施した。図 5、及び図 6 にデモンストレーションの風景を示す。電波暗室内に大きな日本地図を作成し、地図上の数か所に、マイクロ波を照射すると DC 電力に変換して LED を光らせるレクテナ装置を設置した。

図 5 は狭ビームの指向方向を北海道、東北、関東、関西、九州・・・と瞬時に切り替え、マイクロ波によるエネルギー伝送（送電）が、瞬時に切り替えられること示した。また、図 6 は、広ビームを照射することで、広範囲な複数個所に送電できることを示した。

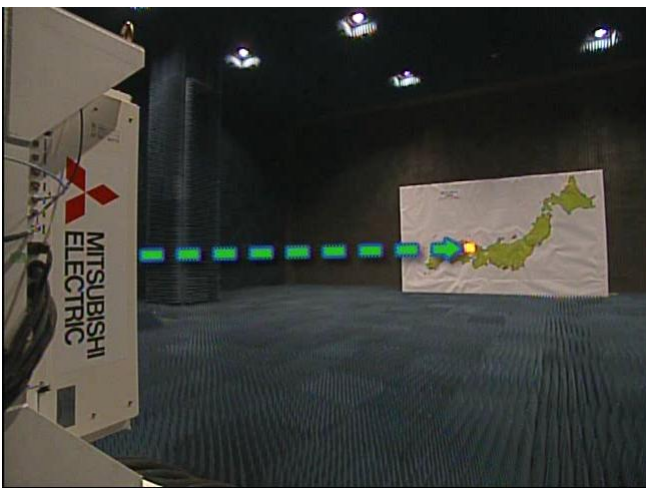


図 5: 狭ビームによる試験



図 6: 広ビームによる試験

3.2. 他のアプリケーションへの応用例

このような送電部の機能は、SSPS に限らず他のマイクロ波エネルギー伝送の分野でも応用が可能である。例えば、図 7 に示すように、複数の負荷装置が広範囲に配置されるシステムにおいて、負荷装置に受電部（レクテナ）を接続して、負荷装置の電源として使用することが考えられる。現在、このような送電部の使い方

で、小型の負荷装置に対する安定した電源供給システムが構築できないか、検討を行っている。

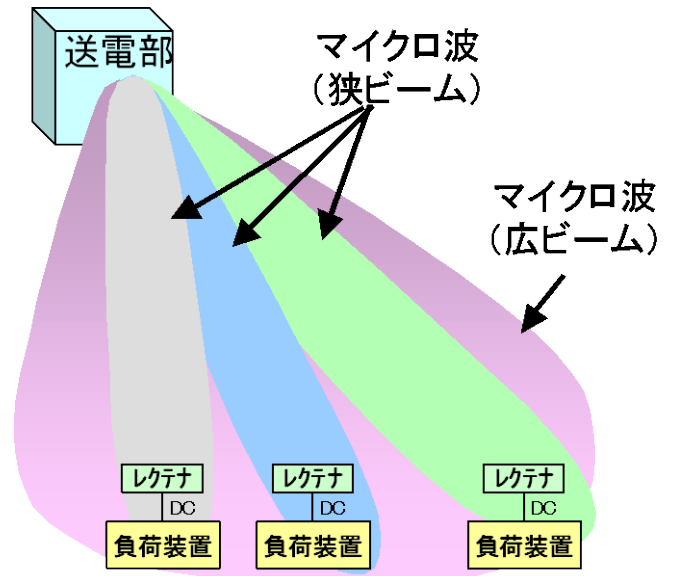


図 7: 広範囲・複数個所への送電実験の概念図

4. まとめ

高度マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーを用いて、マイクロ波エネルギー伝送のキー技術であるビーム方向制御の研究を行った。この送電部は、狭ビームや広ビームの形成や、高速なビーム方向のスイッチングが可能で、それらの特長を活かして、SSPS をイメージしたデモンストレーションや、広範囲・複数個所への送電実験を提案した。これらの例を参考に、今後さらに本送電部が活用されることを期待する。

謝辞

本報告は、「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 平成 23 年度共同利用研究」の研究成果である。

文 献

- [1] 真野清司, 片木孝志, “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方—,” 信学論(B), vol.J65-B, no.5, pp.555-560, May 1982.
- [2] 小島央任 他, “合成電界の振幅位相を用いた素子電界ベクトル回転法の収束性の改善,” 信学秋期大会講演論文集, B-49, pp.2-49, Sep. 1993.