

宇宙太陽光発電 マイクロ波電力伝送技術

本間幸洋* 阿部好邦**
佐々木拓郎** 川津久輝**
高橋智宏**

Microwave Power Transmission Technologies for Space Solar Power System

Yukihiro Homma, Takuro Sasaki, Tomohiro Takahashi, Yoshikuni Abe, Hisateru Kawatsu

要 旨

電力をマイクロ波に変換して送電するマイクロ波電力伝送技術は、コードレスで遠方に送電できる特長があり、センサシステムや飛翔(ひしょう)体への給電、離島や僻地(へきち)への送電、宇宙太陽光発電(Space Solar Power System: SSPS)等の様々なシステムでの実用化が期待されている。三菱電機はこれらのシステムの実現を目指し、マイクロ波電力伝送技術の開発に取り組んでいる。近年では、2009年度から2014年度に経済産業省、一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)が推進した“マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発”に参画した。当社は、実証試験モデルの送電部及びビーム方向制御部の開発と実証試験の実施を担当した。

送電部は、宇宙への輸送、組立てを容易にするために薄

型化に注力して、厚さ25mmを達成した。また、高効率に電力をマイクロ波(5.8GHz帯)変換するためにGaN(窒化ガリウム)デバイスの半導体増幅器を開発し、増幅器単体で平均60.3%の世界最高クラスの効率を実現した。ビーム方向制御部は、パイロット信号を用いて受電部の方向を検知してその方向に自動でマイクロ波を送電するソフトウェアレトロディレクティブ技術と、送電モジュール間に段差が生じた場合に位相誤差を検知・補正する複数モジュールの協調動作技術を開発し、標準偏差で0.15°という高いビーム方向制御精度を実現した。また、屋外試験で約1.8kWのマイクロ波を送電し、設計通り送電部から約55m離れた場所約340Wの直流電力を受電することに成功した。これらの成果から宇宙太陽光発電やマイクロ波電力伝送技術の実現性や有用性が実証され、実用化に向けて大きく前進した。



マイクロ波電力伝送の屋外試験風景

2015年2月から3月に、当社の屋外試験場で実施されたマイクロ波電力伝送の実証試験風景である。送電部から約55m離れた場所に受電部を設置して送電部から5.8GHz帯の約1.8kWのマイクロ波を送電し、約340Wの電力を受電した。

*通信機製作所(工博) **同製作所

1. ま え が き

電力をマイクロ波に変換して送電するマイクロ波電力伝送技術は、コードレスで遠方に送電できる特長があり、センサシステムや飛翔体への給電、離島や僻地への送電、SSPS等の様々なシステムでの実用化が期待されている。当社はこれらのシステムの実現を目指し、2000年からマイクロ波電力伝送技術の開発に取り組んでいる⁽¹⁾。近年では、2009年度から2014年度に経済産業省、J-spacesystems、JAXAが推進した“マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発”に参画した。この研究開発ではSSPSの実現を目指して大規模な送電システムの構築を想定し、キー技術となる複数の送電モジュールを用いたマイクロ波電力伝送技術を実証するための、実証試験装置の開発を行い、2014年度にこれらを用いた実証試験を行った。この中で、当社は送電部及びビーム方向制御部の開発と、実証試験の実施を担当した。

本稿では、これらの装置の開発と実証試験の成果について述べる。

2. SSPSについて

SSPSは、宇宙空間で太陽電池を用いて発電した電力をマイクロ波に変換して地上に送電するシステムである。大型発電所に相当する百万kW級の発電を想定しており、再生可能エネルギーを利用した天候や昼夜に左右されないクリーンで安定した発電システムの実現を目指している。図1に概念図を示す。36,000km上空の静止軌道上に発・送電パネルを多数並べてkm級の発・送電部を構築する。太陽光で発電した電力は送電部でマイクロ波に変換されて地上へ照射され、地上のkm級の受電部でマイクロ波を受信して電力に変換して利用する。このとき、電力を安全に漏れなく受け取るために、マイクロ波を送電部から受電部に正確に照射する技術が必要となる。

3. マイクロ波電力伝送試験モデルの開発

3.1 マイクロ波電力伝送試験モデル⁽²⁾

SSPSを想定して、マイクロ波照射方向を精度よく制御してkW級の電力送電技術を実証することを目的として、マイクロ波電力伝送試験モデル(以下“試験モデル”という。)を開発した。

図2に試験モデルの概念図を示す。電力をマイクロ波に変換して送信する送電部と、マイクロ波を受信して電力に変換する受電部、マイクロ波を制御するビーム方向制御部で構成されている。送電部は4枚の送電モジュールで構成され、大型の送電部を構築する際の変形や日射などによる変形を模擬するために、1枚ごとに変位・回転が可能な構造となっている。マイクロ波のビーム方向は、受電部からガイド信号であるパイロット信号を送信して、その到来方

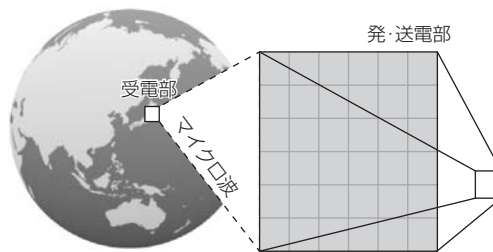


図1. SSPSの概念

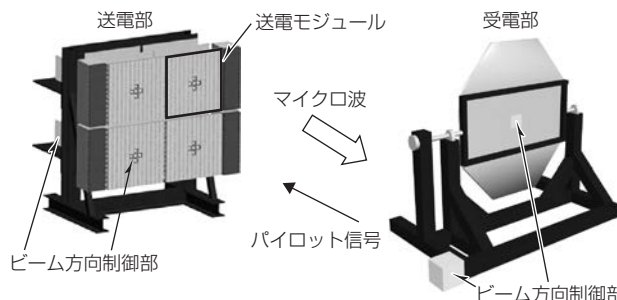


図2. マイクロ波電力伝送試験モデルの概念

向を送電モジュールごとに検知して自動でその方向へ照射・制御される。送電部と受電部には、パイロット信号を送信/受信するビーム方向制御部が組み込まれている。送電モジュールに変位が生じた場合は、それを電氣的に検知する手法として素子電界ベクトル回転法(REV法)⁽³⁾を用いて補正し、正確・高効率に送電する。

3.2 送電部の開発⁽²⁾

送電部は、効率良く電力をマイクロ波(5.8GHz帯)に変換し、ビーム方向制御指示値に従って正確にマイクロ波を照射する機能が必要である。また、多数の送電モジュールをロケットで打ち上げて宇宙で組み立てることを想定すると、薄型、軽量が望まれる。このような高い電気性能(効率等)と機械性能(薄型、軽量)の両立を目指して送電部(要旨の図)を開発した。

図3に送電モジュール(サブアレー部)の外観を、表1に主な性能試験結果を示す。電力をマイクロ波に変換するHPA(High Power Amplifier)にはGaNデバイスの半導体増幅器を用いて、304個(76個/送電モジュール×4)の平均で60.3%の高い効率を実現した。送電モジュールは量産性や大規模化を考慮した構成で、これまでの類似装置⁽¹⁾の1/10以下の厚さ25mmを達成した。また図4に、4枚の送電モジュールで送電した際のアジマス放射パターンを示す。設計値とよく一致しており、送電の指令値に従って正確にマイクロ波を送信していることが分かる。

3.3 ビーム方向制御部の開発

複数の送電モジュールで送電する場合、各送電モジュールの回転や段差に応じたビーム方向と位相差の補正が必要となる(図5)。試験モデルでは、ビーム方向の制御にソフトウェアレトロディレクティブ技術を、位相差の制御に複数送電モジュールの協調動作技術を開発した⁽⁴⁾。

3.3.1 ソフトウェアレトロディレクティブ技術

大電力を送電するSSPSでは、極めて高精度なマイクロ波のビーム方向の制御が要求される。これを実現するために、受電部から送信されるパイロット信号の到来方向を検知し、この方向に自動でマイクロ波を送信するソフトウェ

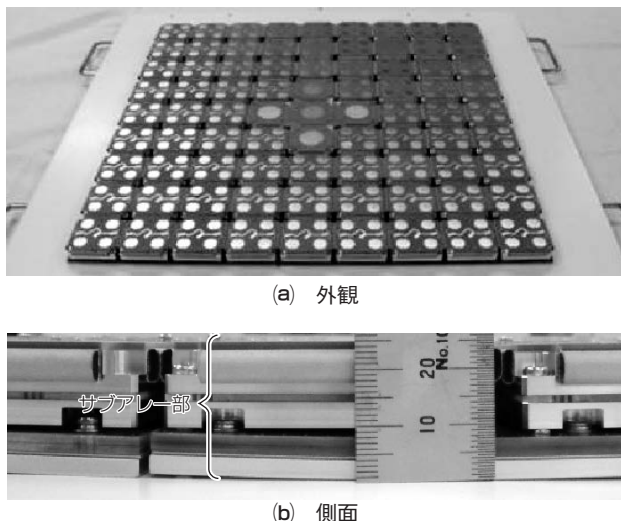


図3. 送電モジュール(サブアレー部)

表1. 送電モジュールの主要な性能試験結果

項目	実測値
送電モジュール寸法	599×600(mm)
サブアレー部	厚さ：25mm(突起物を除く) 質量：16.1kg以下
周波数	5.8GHz(連続波(CW))
出力電力	423W以上(送電部全体で1.795W)
効率	総合：35.1%以上 最終段HPA：平均60.3%

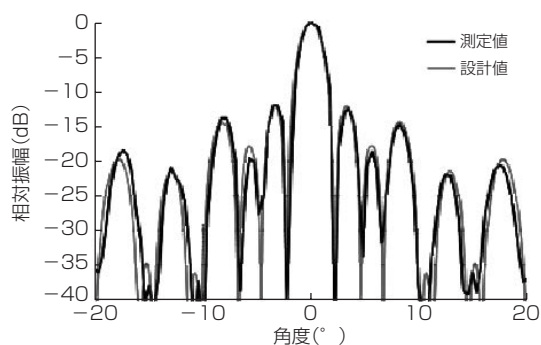


図4. アジマス面放射パターン

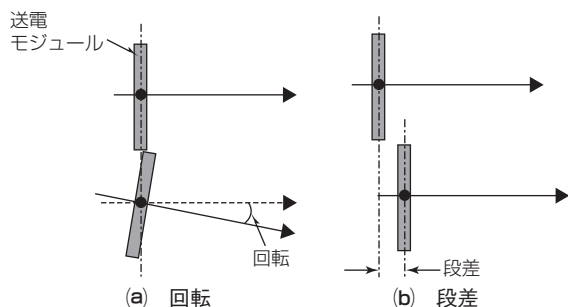


図5. 送電部の変形

アディレクティブシステムを開発した。このシステムでは、パイロット信号の到来方向の高精度な検知が重要であり、今回は、衛星通信システム等で実績のある複数のアンテナビームを一組として用いてアンテナ正面方向からのずれ角を検出する振幅モノパルス方式を採用した⁽⁵⁾。図6に、このシステムの実現のために開発したパイロット信号受信アンテナを示す。左右2つのアンテナ(A, B)と上下のアンテナ(C, D)で、それぞれパイロット信号の方位角と仰角を検出する。また、左右、上下の2素子ペアから得られた信号を、中央の素子(S)で受信した信号で規格化することで、パイロット信号の強度変動による誤検知を防止する。

図7にビーム方向制御部のブロック図を示す。パイロット信号受信アンテナで得た信号はダウンコンバータで中間周波数に変換され、追尾受信機はこの信号を用いて高速にパイロット信号到来方向を検知する。アンテナ制御装置(ACU)は、この信号を基に送電部のビーム方向の指令値を算出して送電部のビーム方向を制御する。このシステムを送電部に組み込み、パイロット信号到来方向検出精度を試験した結果、検出誤差の標準偏差で0.078°の高い精度を実現した。

3.3.2 複数モジュールの協調動作技術

送電モジュール間の段差に応じた送電マイクロ波の位相誤差を高精度に検知・補正する方法として、REV法を用いた複数送電モジュールの協調動作技術を開発した。REV法は、アンテナ1素子の励振位相を変化させた時の合成電力が正弦波を描くことを利用して、各アンテナ素子

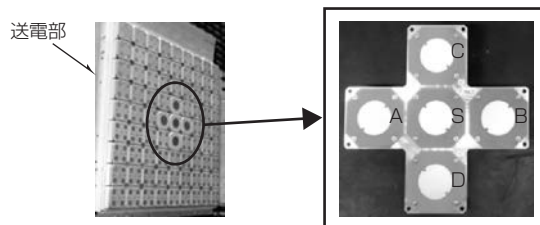


図6. パイロット信号受信アンテナ

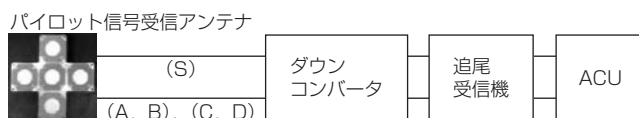


図7. ビーム方向制御部のブロック図

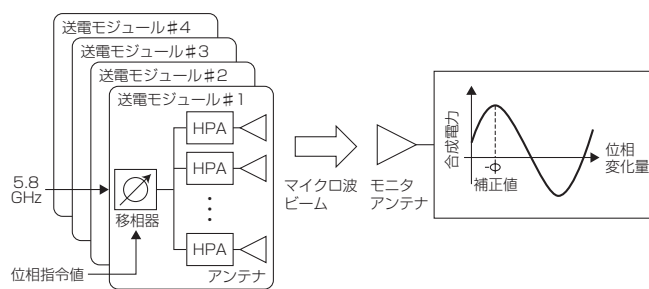


図8. 位相補正值の測定の概念

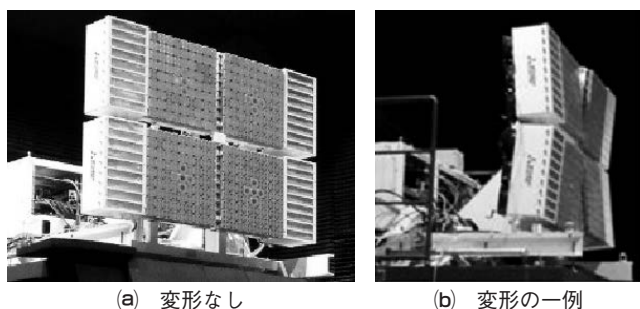


図9. 送電部の変形の様子

の素子電界(振幅, 位相)を求める方法である。図8に, 送電モジュール間の段差に応じた位相補正値の測定の概念図を示す。送電モジュールごとに移相器で位相を順次変化させて受電部中央で受信する合成電力を測定し, その情報から各送電モジュール間の段差に相当する位相差を検出する。検出された位相差を補正値として各送電モジュールの移相器へ指令して補正することで, 送電マイクロ波ビームを形成できる。

4. 実証試験結果

開発した試験モデルを用いて, 屋内の電波暗室では主にビーム制御精度の評価試験を, 屋外ではkW級のマイクロ波無線電力伝送試験, 及び送電した電力を利用してアマチュア無線局を運用する実用化実証試験⁽⁶⁾を行った。

4.1 屋内試験

屋内試験は京都大学宇治キャンパスの電波暗室で実施した。ソフトウェアレトロディレクティブ技術及び複数モジュールの協調動作技術を用いて, マイクロ波を自動送信した場合のビーム方向制御精度の検証を行った。送電部と受電部の距離は約10mに設定し, 図9に示すような送電モジュールに変形がない時や変形がある時の合計8ケースで, ビーム方向制御精度を評価し, 標準偏差で0.15°という高いビーム方向制御精度を達成した⁽²⁾⁽³⁾。

4.2 屋外試験

屋外試験は当社の屋外試験場で実施した(要旨の図)。送電部から約55mに受電部を設置し, 送電部に段差がない状態でマニュアルでビーム方向を設定して送電した。約1.8kWのマイクロ波を送電した場合, 平均340Wの直流電力(設計値: 最大340W程度)を受電し, 設計通りの電力を受電していることを確認した。また, 送電モジュール間に段差を設けてREV法を用いて位相補正する送電実験を行った。図10に, 段差の様子と位相誤差の補正なし/ありの場合の受電面での受信レベル分布を示す。送電部の下側2枚に波長の約1/2に相当する30mmの段差を設けて補正した場合, ビーム方向指示値の受電面に理想的なマイクロ波ビームが形成されている。また, 受電電力は補正がない場合は90W程度, 補正した場合は330W程度の直流電力が得られ, 段差がある場合でも協調動作を行うことで段差がない場合と同程度の電力が得られることを確認した⁽⁷⁾。

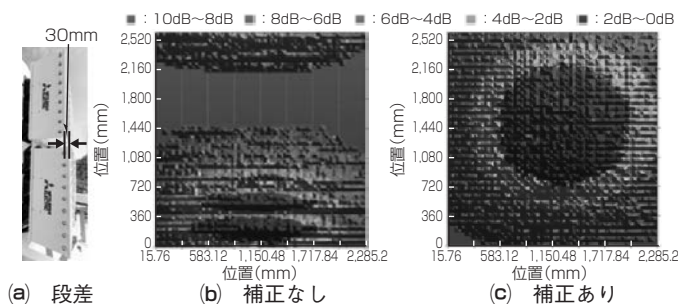


図10. 段差に応じた位相補正による電力分布

5. むすび

SSPSのマイクロ波電力伝送技術を実証するために, マイクロ波電力伝送試験モデルを開発して実証試験を行った。送電部は半導体増幅器を用いて, これまでにない薄型・高効率の両立を達成した。また, ソフトウェアレトロディレクティブ技術と複数モジュールの協調動作技術を開発し, 高精度なビーム方向制御精度と高効率な送電を実証した。これらは, 将来の長距離・大型化を想定したマイクロ波電力伝送技術の実現性・有効性を示す大きな技術進捗である。この成果を基に, SSPS計画の推進やマイクロ波電力伝送技術の産業応用が更に加速されることを期待する。

この研究開発は経済産業省からJ-spacesystemsが受託した“マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発”, 及びJAXAの“マイクロ波電力伝送上実験システム用ビーム方向制御装置の開発”の一環として行われた。関係機関の皆様のご支援に感謝申し上げます。

参考文献

- (1) Homma, Y., et al.: New Phased Array and Rectenna Array Systems for Microwave Power Transmission Research, IEEE IMWS-IWPT Proc., 59~62 (2011)
- (2) Mihara, S., et al.: Microwave Transmission Experiment on the Ground for the Future SSPS, ISTS Proc., 2015-q-04 (2015)
- (3) 真野清司, ほか: 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-, 電子情報通信学会論文誌(B), J65-B, No.5, 555~560 (1982)
- (4) 牧野克省, ほか: SSPSの実現に向けた高精度マイクロ波ビーム方向制御装置の開発とその技術実証試験, 電子情報通信学会技術研究報告, 115, No.91, 37~42 (2015)
- (5) 吉田 孝 監修: 改訂 レーダー技術, コロナ社 (1996)
- (6) JAXA イベントHP: マイクロ波無線電力伝送上試験/実用化実証(デモンストレーション)
- (7) 牧野克省, ほか: 素子電界ベクトル回転法を用いたマイクロ波ビーム方向制御技術の地上実証試験, 第59回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2015)