

地上無線送電実験 ～位置づけと今後の展望～[†] Microwave Transmission Experiment on the Ground for SSPS

中村 修治^{*1‡}・前川 和彦^{*2}・佐藤 正雄^{*2}・
佐々木 謙治^{*2}・三原 荘一郎^{*2}

Shuji NAKAMURA, Kazuhiko MAEKAWA, Masao SATO and Kenji SASAKI and Shoichiro MIHARA

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)〈旧無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)〉では、平成21年度(2009年度)より経済産業省(METI)から委託を受けて「太陽光発電無線送電技術研究開発(マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発)」事業を推進し、平成26年度(2014年度)を以て目標を達成して終了した。ここではマイクロ波による宇宙太陽光発電の中核的技術である無線送電技術の確立に向けて、不可欠な精密ビーム制御技術の確立と地上での応用を図る目的で、試験モデルを試作し、屋内(電波暗室)及び屋外における電力伝送試験を実施した。我々が取り組んだ研究開発の概要および成果について紹介する。

Japan Space Systems (J-spacesystems) has been studying wireless power transmission (WPT) since the beginning of 2000 as a key technology for the realization of future Space Solar Power System (SSPS). We have started the ground WPT experiments project from FY2009 which included kW level electrical power, under the contract of Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). In this program, we have developed thin phased array antenna by four subpanels. High power amplifiers with high efficient GaN HEMT and class-F circuits, were applied to produce the microwave power. The result of the development satisfied our requirement and Ground experiment was completed as planned.

Keywords : Microwave Power Transmission, Transmitting & Receiving Section, Ground Test

1. マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発

「マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発」の主な内容は、以下のようである。

- 複数のフェーズドアレイアンテナ間の位相同期を行い、レトロディレクティブ技術を活用し、マイクロ波ビームを受電アンテナに向けて指向制御する精密ビーム制御技術の研究開発を実施する。
- マイクロ波電力伝送試験モデルを試作し、屋内試験施設(電波暗室)において送電モジュールのビーム制御精度の確認試験を実施する(伝送距離10m以上において角度精度0.5度のビーム制御の達成を目標とする)。
- また屋外試験地において複数送電モジュールの協調動作試験を実施し、ビーム制御による電力伝送を確認し評価する(伝送距離50m程度において電力伝送の実現を目標とする)。

なお、レトロディレクティブ技術(ビーム方向制御技術)の研究開発については、(当時)独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)が実施しており、双方が連携・協力して研究開発を実施した。

1.1 マイクロ波電力伝送試験(地上)の特徴¹⁾ マイクロ波を利用したエネルギー伝送技術の地上での無線送電試験は、これまで国内・国外でいくつかの実施例があり、いずれも将来の宇宙太陽光発電システム(SSPS)への応用を目指して開発され、実施されている。これまでにおける大出力の試験の特徴としては、

- パラボラ型送電アンテナ
- 電子管(マグネトロン)方式増幅器
- 電力伝送周波数2.45GHz

の組合せが主体であった。

また、マイクロ波ビーム方向制御について、屋外での定量的検証は行われていない。

実用レベルでのマイクロ波による宇宙太陽光発電システムでは、静止軌道上の送電設備から地上の受電設備に向けて、数多くのマイクロ波を合成し、ビームを形成して高精度で指向制御する技術が必要となる。これらは今後、軌道上実証を行う際にも必要不可欠な技術である。本研究開発では将来の発展性をも考慮して以下の技術を組み合わせた地上実証を行った。(第1表参照)

[†] 第1回宇宙太陽発電シンポジウム, 2015年12月15-16日, 東京にて発表

[‡] Corresponding author: Shuji Nakamura.
E-mail: Nakamura-Shuji@spacesystems.or.jp

^{*1} 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8

Japan Space Systems,

3-5-8 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo 105-0011, Japan

第1表 マイクロ波電力伝送試験（地上）の特徴

項目	将来の発展性・利点
フェーズドアレイアンテナを使用	従来のパラボラアンテナに比べ、将来の宇宙での大型アンテナ構築につながる技術
電力伝送周波数に5.8GHzを使用	従来の2.45GHzに比べてシステムの小型化が可能となり、将来の宇宙への輸送に有利
半導体増幅器を使用	従来のマグネトロン(電子管)方式に比べて薄型化に有利。また低電圧での動作も宇宙での使用に向く
ソフトウェアレトロディレクティブ方式を使用	送受電の周波数が任意に選択可能であり、パイロット信号に変調波や鍵機能を付与することも可能

1.2 マイクロ波電力伝送試験モデル^{2,3)} 試作する電力伝送試験モデルのイメージ図について図1に送電部を、図2に受電部を示す。各送電モジュールの中心部および中央の受電モジュール中心部には、ビーム方向制御部のパイロット信号受信、送信アンテナがそれぞれ取り付けられている。

(1) 送電部

送電部は半導体を使用したフェーズドアレイアンテナを使用し、4枚の送電モジュールでアレイアンテナを構成し、マイクロ波の位相同期を図りつつ、約1.8kWの送電出力を可能とした。送電部の主要諸元を表2に示す。



第1図 送電部の外観

(2) 受電部

受電部の整流用ダイオードには市販品の中から効率の良いものを選択して使用した。受電部は複数の受電モジュールから構成され、試験等における取扱いが容易なものとした。受電部の主要諸元を表3に示す



第2図 受電部の外観

第2表 送電部主要諸元

項目	主要諸元
使用周波数	5.8GHz ±75MHz (円偏波)
システム構成	4モジュール構成
モジュールサイズ	約0.6m×0.6m
ビーム拡がり角	全システムで約3度のビーム形成 (-3dB ビーム幅)
送電出力	400W以上/モジュール 1,600W以上/システム (4モジュール) 別途、低出力モードを持つこと
アンテナ素子間隔	0.65波長±0.02波長(λ) λは中心周波数に対応
アンテナ素子数	300素子以上/モジュール。中心部にビーム方向制御部用にアンテナ20素子分の設置スペースを確保
マイクロ波増幅器個数	76個以上/モジュールとして、1増幅器で4素子アンテナに給電
マイクロ波増幅器効率	60%以上
移相器	5bit (MMIC 移相器)
送電部総合効率	30%以上

第3表 受電部主要諸元

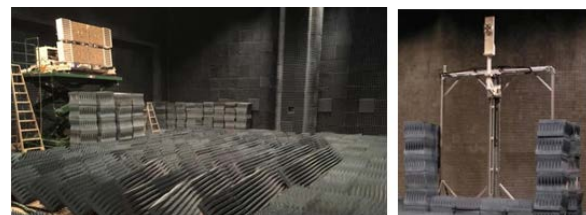
項目	主要諸元
受電パネルサイズ	約2.6×2.3mの円状配列
受電パネル枚数	1枚(受電パネルは、36個の受電モジュールで構成)
ダイオード	ショットキーバリアダイオード
RF-DC変換効率	50%以上 (アンテナ～レクテナ制御ユニット出力)
電磁再放射抑制	受電パネルで発生する2次～4次高調波再放射を抑制
自動点検計測機能	故障したレクテナを含む受電モジュールの特定、故障レクテナの特定を行う。

ルから構成され、試験等における取扱いが容易なものとした。受電部の主要諸元を表3に示す

1.3 マイクロ波電力伝送試験

(1) 屋内試験

マイクロ波無線電力伝送試験モデルを使用して、屋内試験地(京大大学生存圏研究所 A-METLAB)において送電モジュールのビーム制御精度試験を実施し、伝送距離10メートル以上(約10.1m)において角度精度0.5度 rms (rms :



(送電部)

(X-Y スキャナー)

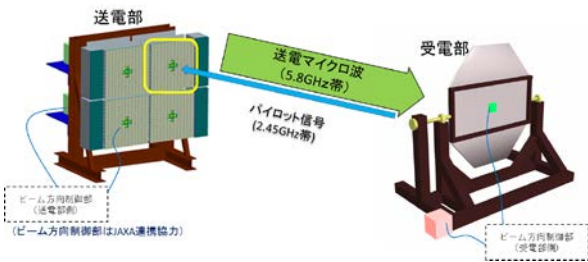
第3図 屋内試験状況 (伝送距離: 10m 以上)

二乗平均平方根)の達成目標に対して、0.15度rmsを確認した。屋内試験状況を図3に示す。電波暗室の高対電力電波吸収体の方向に送電するような機器レイアウトとした。マイクロ波を受ける側に設置している機器は、ビームの方向制御精度を計測するためのX-Yスキャナーである。

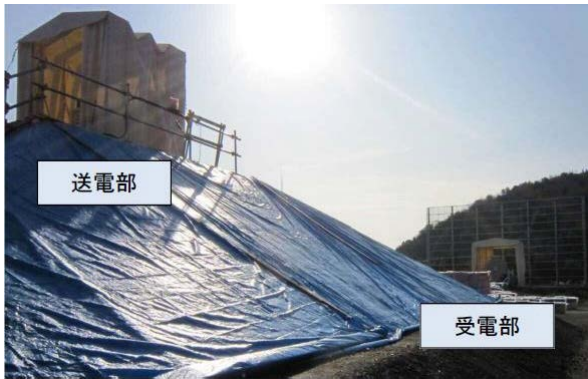
(2) 屋外試験

また、屋外試験地(兵庫県内の試験場)において複数送電モジュールの協調動作試験を実施し、伝送距離50メートル程度(約54m)において平均約340Wの利用可能電力の取出しを確認した。

5.8GHz帯でフェーズドアレイアンテナを用いて大電力マイクロ波のビーム制御を行うシステムの屋外無線送電としては、世界的に類を見ない試験に成功した。図4にマイクロ波送受電イメージを、図5に屋外試験状況を示す。



第4図 マイクロ波送受電イメージ



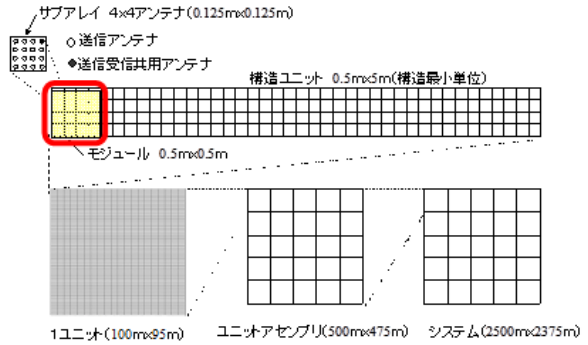
第5図 屋外試験状況

1.4 これまでの成果と今後 今回のマイクロ波電力伝送試験モデル送電部のモジュールは、将来のSSPS構造ユニットのモジュール(図6に示す)を模擬したものである。本研究開発では、半導体増幅器を使用した複数のフェーズドアレイアンテナ間の位相同期を行い、レトロディレクティブ技術を活用し、キロワット級のマイクロ波ビームを受電アンテナに向けて指向制御(精密ビーム制御)し、受電部で利用可能な電力を取り出しに成功した。

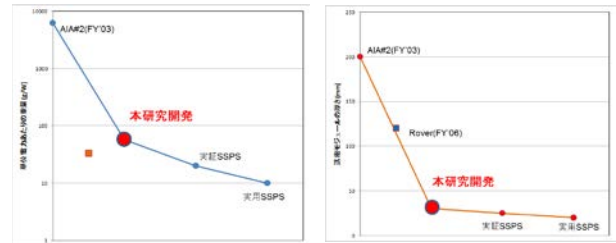
また、理論的に送電アンテナ規模の拡大に応じてビーム制御精度も向上することから、約1.2m四方の送電パネルから伝送距離10m以上で0.15度のビーム制御精度が得られたことは、将来SSPSが静止軌道上からキロメートルサイズで送電する場合にも、適用できる可能性が裏付けられた。

送電部、受電部における効率は将来SSPS各部の総合効率約80%に比べて、およそ35%と42%である。送電部は、

輸送に大きく影響を与える薄型・軽量化において、将来SSPS電気的コア部分約4mmに対して25mm(サブアレイ厚さ)、同10g/Wに対して約36g/W(サブアレイのみ)である。J-spacesystems(旧USEF)が、これまでに研究試作した成果と、今回の送電部の結果について、図7に送電モジュール厚さ(mm)と単位電力重量(g/W)の推移として示す。



第6図 将来SSPSの送電アンテナ階層構造とモジュール



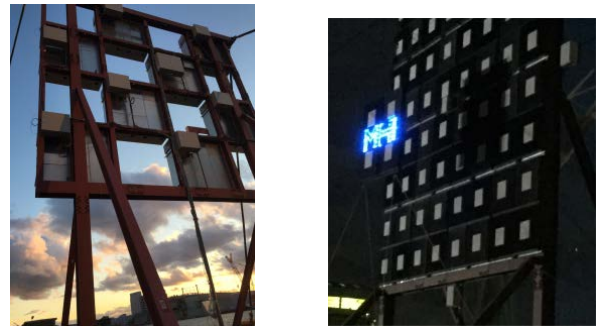
第7図 送電モジュール厚さ(mm)と単位電力重量(g/W)

今後の課題として更なる高効率化や薄型・軽量化が必要であることから、現在の「太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発」事業において取り組んでいる。

2. 無線送受電スピノフ技術の研究開発⁴⁾

本研究開発では将来の宇宙利用を念頭に置きつつも、地上での直近の技術応用としての可能性を探り、既存技術の応用を目指して、無線送受電スピノフ技術の実証システムを試作し、試験を実施した。

図8にスピノフ技術実証システムの外観を示す。但し、宇宙用途での小型化、薄型化の要求を緩和し、ハードウェア構成には成熟度の高い技術を活用してコスト低減を図っ



第8図 スピノフ技術実証システム外観 (左: 送電ユニット, 右: 計測ユニット)

た。

本技術実証システムを使用して、2.45GHz 帯で伝送距離約 500m において約 10kW の送電出力試験を行い、制御された条件下での動作を確認した。これは国内では最長、最大級電力の屋外無線送電試験の成功となった。

3. おわりに

平成27年1月に宇宙開発戦略本部が決定した宇宙基本計画では、エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、宇宙の潜在力を活用して地上の生活を豊かにし、活力ある未来の創造につながる取組や（略）研究を推進する、とされている。

本研究開発においては、マイクロ波による宇宙太陽光発電の中核的技術である無線送受電技術の確立に向けて、不可欠な精密ビーム制御技術を地上において実証することに加えて、地上応用を目指した実証システムを試作・評価した。

この目標達成が地上での様々な利用の場での活用と共に、将来の宇宙利用につながるものと認識してさらに研究を進めてゆく所存である。

参 考 文 献

- 1) 中村修治, 齊藤孝, 佐藤正雄, 佐々木謙治, 三原荘一郎: 地上無線送電実験-位置づけと今後の展望, 第17回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム (2014).
- 2) 齊藤孝, 前川和彦, 佐藤正雄, 中村修治, 佐々木謙治, 三原荘一郎: 宇宙太陽光発電システムのためのマイクロ波電力伝送地上試験, 電子情報通信学会無線電力伝送研究会 (WPT), (2015).
- 3) 中村修治, 前川和彦, 佐藤正雄, 佐々木謙治, 三原荘一郎: 太陽光発電無線送受電技術の研究開発と成果, 第59回宇宙科学連合講演会 (2015).
- 4) 安間健一, 中村修治, 佐々木謙治, 佐藤正雄: 無線送受電技術の地上応用 (スピンオフ) 実験, 第59回宇宙科学連合講演会 (2015).

(2016. 1. 18 受付)