

## マイクロ波電力伝送試験モデルの受電部 レクテナアレイシステムの特性評価

小澤 雄一郎<sup>†</sup> 田中 直浩<sup>†</sup> 藤原 暉雄<sup>†</sup> 篠原 真毅<sup>‡</sup> 三谷 友彦<sup>‡</sup>  
三原 荘一郎<sup>‡</sup> 中村 修治<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>(株)IHI エアロスペース 〒370-2398 群馬県富岡市藤木 900

<sup>‡</sup>京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

⌘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

E-mail: <sup>†</sup> {yuichiro-ozawa, n-tanaka}@iac.ihl.co.jp, qfuji@js5.so-net.ne.jp

<sup>‡</sup> {shino, mitani}@rsh.kyoto-u.ac.jp

⌘ {Mihara-Shoichiro,Nakamura-Shuji}@jspacesystems.co.jp

**あらまし** 宇宙空間で太陽光発電してその電力をマイクロ波に変換し、地上に設置された受電システムで商用電力として取り出す宇宙太陽光発電システム (SSPS) 構想が検討されている。SSPS の実現には、宇宙空間への大量輸送技術、大規模建造物の建設技術とともにマイクロ波送受電システムの高効率化が重要な課題である。我々はこれまで受電部の高効率化に取り組んでおり、昨年度までにアンテナと整流回路が一体となった受電モジュール、レクテナに最適負荷を提供するレクテナ制御ユニットとを組み合わせ一系統の受電システムを構成し、効率評価を実施した。本年度は、これらの受電モジュールとレクテナ制御ユニット等を組み合わせて受電モジュール ASSY とし、それらを 36 台製作して効率評価を行った。本稿では今年度製作した受電モジュール ASSY の効率評価結果について報告する。

**キーワード** レクテナ、マイクロ波送電、宇宙太陽光発電システム

## Receiving Section of Microwave Power Transmission Test Model Characteristic Evaluation of Rectenna Array System

Yuichiro OZAWA<sup>†</sup> Naohiro TANAKA<sup>†</sup> Teruo FUJIWARA<sup>†</sup>

Naoki SHINOHARA<sup>‡</sup> Tomohiko MITANI<sup>‡</sup>

Takashi Saito<sup>⌘</sup> Masao Sato<sup>⌘</sup> Shuji Nakamura<sup>⌘</sup> and Kenji Sasaki<sup>⌘</sup>

<sup>†</sup> IHI AEROSPACE CO., LTD., 900 Fujiki, Tomioka, Gunma, 370-2398, Japan

<sup>‡</sup> Research Institute for Sustainable Humanosphere Kyoto University,

Gokasho Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

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

E-mail: <sup>†</sup> {yuichiro-ozawa, n-tanaka}@iac.ihl.co.jp, qfuji@js5.so-net.ne.jp

<sup>‡</sup> {shino, mitani}@rsh.kyoto-u.ac.jp

⌘ {Mihara-Shoichiro,Nakamura-Shuji}@jspacesystems.co.jp

**Abstract** Realizing the SSPS in the future demands high-efficiency receiving section. We have studied high-efficiency receiving section. The receiving section consists chiefly of huge rectennas and the control circuits. We produced 36 rectenna module assemblies. The assembly consists of 64 rectennas and 1 control circuit. The paper reports the characteristic evaluation result of the rectenna module assemblies.

**Keyword** Rectenna, Microwave Transmission, SSPS

## 1. はじめに

マイクロ波を用いた宇宙太陽発電システム（SSPS）は、静止軌道上を周回する発電・送電衛星システムと地上に設置される受電システムで構成し、クリーンで24時間安定した電力を地球に供給する発電システムの構想である。SSPSは1960年代に米国にて提唱され、その後米国や日本を中心に実現へ向けた研究が進められてきた[1][2]。さらに近年日本では、地上実証に向けた研究開発および宇宙実証へ向けた検討も進められている[3][4]。

SSPSの実現にはシステムの高効率化が重要な課題の一つであり、宇宙を周回する発電電部の高効率化だけでなく、地上の受電部の高効率化も重要である。この受電部は大規模なレクテナアレイであり、これを高効率・安定動作させるにはレクテナを最適条件で動作させ、安定したDC出力を得るレクテナ制御ユニットが必要である[5]。

本年度も経済産業書の委託を受けて一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構（J-spacesystems）殿が（独）宇宙航空研究開発機構（JAXA）殿と連携して実施している、太陽光発電無線送電技術の研究開発事業において、マイクロ波電力伝送試験モデルの受電部の開発を行っている。昨年度までに J-spacesystems 殿ご指導の下開発している受電部の要素実験として、複数のレクテナで構成される受電モジュールと、それを高効率制御するレクテナ制御ユニットを組合せた要素試験を実施した[6][7]。本年度は、これらを合わせた受電モジュール ASSY（レクテナアレイシステム）を36台製作し、その受電モジュール ASSY ごとの評価を高度マイクロ波エネルギー伝送実験装置（A-METLAB）にて実施した。今後36台の受電モジュール ASSY を受電パネル架台に設置し、約2.6m×2.3mの受電面を構成し、マイクロ波電力伝送試験モデルの受電部評価を実施する計画である。本稿では、受電モジュール ASSY を36台製作し、評価した結果について報告する

## 2. 受電モジュール ASSY の仕様

図 2-1 に本実験に供した受電モジュール ASSY の構成を示す。受電モジュールは、マイクロ波を受電してDCに変換する受電モジュール、受電モジュール内のレクテナ出力の接続設定を可能とする受電モジュール点検ボード、受電モジュール内のレクテナに最適動作点を提供するレクテナ制御ユニットから構成される。受電モジュール ASSY のアンテナ面にマイクロ波を照射することにより、レクテナ制御ユニットからDC電力が出力される。表 2-1 に受電モジュール ASSY の基本仕様を示す。

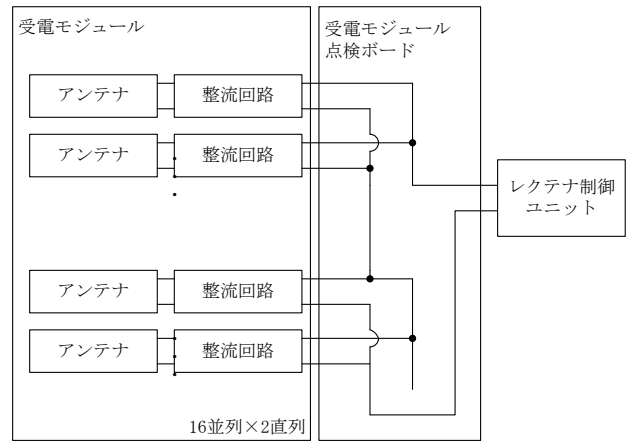


図 2-1：受電モジュール ASSY の構成

表 2-1 受電モジュール ASSY 仕様

項目	仕様	備考
寸法	370×320mm	
中心周波数	5.8GHz	
アンテナ配置	三角形配置	
アンテナ間隔	0.9λ	
アンテナ数	64 素子	
アンテナペア数	32 個	
整流回路数	32 回路	1 回路内に 2 整流回路並列
整流回路出力接続	16 並列 ×2 直列	
レクテナ定インピーダンス制御	24±1[Ω]	
レクテナ定電圧制御	18.8±0.2[V]	
出力電圧	30～60[V]	
RF-DC 変換効率	55[%]以上	ASSY として

## 3. 受電モジュール ASSY 特性評価試験

### 3.1. 受電面電力密度分布の測定

高度マイクロ波無線電力伝送用フェーズドアレー（送電アンテナ）から17.5m離れた受電モジュールを設置する位置に、利得が既知（7.8dBi）であるパッチアンテナを用い、供試体である受電モジュール ASSY の各アンテナ位置の電力密度を測定した。測定では受電アンテナパネルの横に送電パターンモニタ用アンテナを設置し、送電パターンの安定性を確認した。その結果、同条件で送電すれば十分安定した送電パターンが得られていることを確認した。図 3.1-2 に測定した受電面の電力密度分布を示す。本実験では受電面における電力密度分布がわかればよく、特にビーム中心を受電面中心に指向させる必要は無いことから、この状態で実験を行うこととした。電力密度は送電器出力を

15%、25%、45%、55%、65%としてそれぞれ取得した。

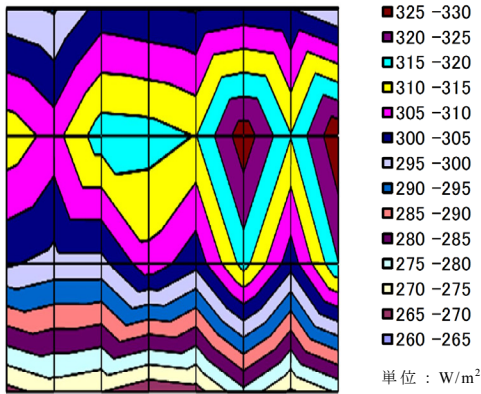


図 3.1-1: 電力密度測定状況 (代表例: 送電出力 65%)

### 3.2. 受電モジュール ASSY の効率測定

試験状況を図 3.2-1 に示す。

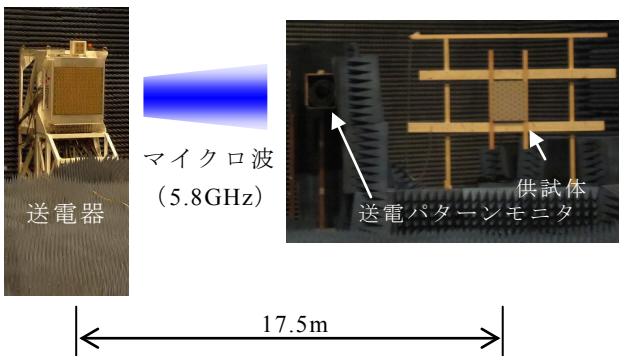


図 3.2-1: 試験状況

次に受電モジュール ASSY の RF-DC 変換効率の定義を以下に示す。

$$\text{効率} = \frac{\text{受電モジュールASSY出力電力}}{\sum(\text{受電アンテナ実効開口面積} \times \text{電力密度})} \times 100 \dots \dots (1)$$

本受電モジュール ASSY はアンテナと整流回路が一体となったものであり、受電アンテナ実効開口面積(利得)を直接測定できないことから、本受電モジュール ASSY と同じ設計のアンテナパネルにて求めた実効開口面積を使用した。また、電力密度は 3.1 項にて測定した値を使用した。受電モジュール ASSY 出力電力は、受電モジュール ASSY の構成部品であるレクテナ制御ユニットの DC 出力電圧および電流を測定して算出した。なお、レクテナ制御ユニットを動作させるために外部から供給する電力もレクテナ制御ユニットにおける消

費電力(電力損失)とし、受電モジュール ASSY の効率に含めた。

図 3.2-1 に 36 台の受電モジュール ASSY の RF-DC 変換効率測定結果の代表例として S/N : 001 の結果を示す。最大で 60[%]の効率が得られている。

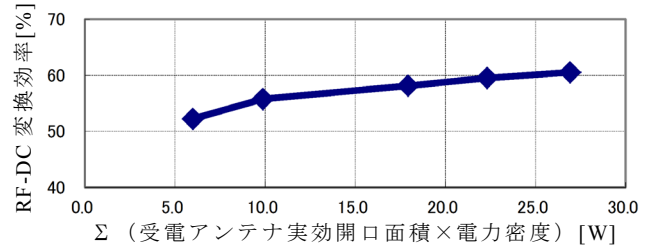


図 3.2-1: 受電モジュール ASSY の RF-DC 変換効率測定結果 (代表例 S/N : 001)

図 3.2-2 には 36 台の受電モジュール ASSY の RF-DC 変換効率最大値のヒストグラムを示す。受電モジュール ASSY 36 台の RF-DC 変換効率最大値は 59~62%であった。なお、測定誤差は RMS で約 6%程度と見積もっている。

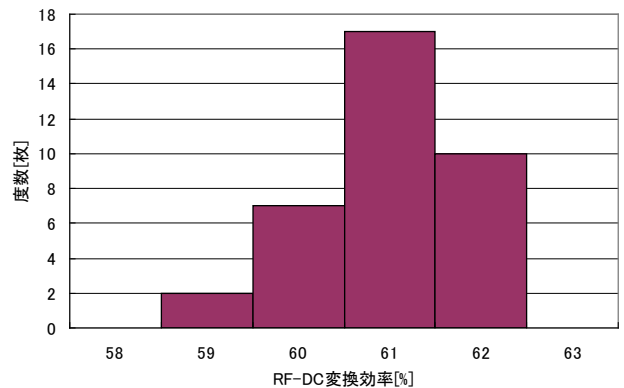


図 3.2-2: 受電モジュール ASSY の RF-DC 変換効率最大値測定結果

### 4. 受電モジュール ASSY 総合効率

本来、受電部は入射したマイクロ波を漏れなくアンテナで受電し、それを整流回路で DC に効率良く変換して出力する必要がある。しかし、本受電モジュール ASSY では今後組み立てる受電装置全体のサイズを維持するためにアンテナの間引きによる計画見直しを過去に行っており、受電面の物理的な面積と比較して受電アンテナの実効開口面積は小さい。しかし現時点で受電モジュール ASSY のアンテナ面積占有率まで含めた総合効率がどの程度であるかを算出しておくことは今後の受電部高効率化のためにも重要である。表 2-1

に示すサイズを受電モジュール ASSY 受電面に対し、3.2 項で用いた実効開口面積の比を求めると、75%となる。よって、本受電モジュールでは、受電面に入射した電力のうち 75%がアンテナで受電され、後段の整流回路に入力されていることになる。

これらから、今回製作した受電モジュール ASSY の総合効率は、44～47%となる。

## 5. 今後の計画

本稿で評価結果を示した受電モジュール ASSY36 枚を同一平面上に配置した受電装置を組み立てる。図 5-1 に受電装置外観図を示す。全体で幅 3.7m、高さ 3.5m、奥行き 2m 程度となる。また、質量は受電装置全体で 1450kg であるが、受電および RF-DC 変換に寄与する受電モジュール ASSY の質量は 68kg であり、全体の 5%程度である。主な質量要因は屋外での試験に耐える構造体である。

今後、受電装置としての機能・性能評価を行った後、J-spacesystems 殿が開発している送電部および JAXA 殿が開発しているビーム方向制御部と組合せて屋内および屋外試験を実施する計画である。

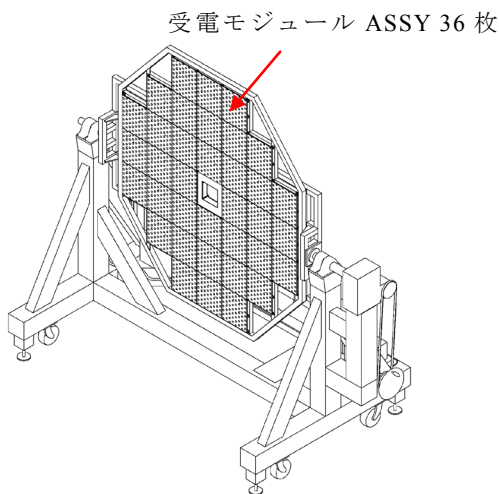


図 5-1 : 受電装置外観

## 6. まとめ

A-METLAB を利用して 5.8GHz のマイクロ波を受電モジュール ASSY に照射し、レクテナアレイシステムの効率評価を行った。測定の結果、受電モジュール ASSY36 台の RF-DC 変換効率最大値は 59～62%であり、目標である 50%以上の効率を満足することが確認できた。今後、受電モジュール ASSY36 台を受電装置として組み上げ、その機能・性能評価を実施した後、J-spacesystems 殿が開発している送電部および JAXA 殿が開発しているビーム方向制御部と組合せて屋内お

よび屋外試験を実施する計画である。

## 文 献

- [1] Glaser, P.E., “Power from the Sun; Its Future”, Science, 162, pp.857-886, 1968
- [2] DOE and NASA report, “Satellite Power System; Concept Development and Evaluation Program”, Reference System Report, Oct. 1978. (Published Jan. 1979)
- [3] 三原 莊一郎 他, “USEFにおけるSPSへの取組み”, 第13回 宇宙太陽発電衛星システム (SPS) シンポジウム講演要旨集, pp.34-39, Oct. 2010.
- [4] 佐々木 進, “JAXAにおけるSSPSの研究状況と課題”, 第13回 宇宙太陽発電衛星システム (SPS) シンポジウム講演要旨集, pp.29-33, Oct. 2010.
- [5] (財) 機械システム振興協会, “作業用ロボットへのマイクロ波送電および通信技術の開発に関するフェージビリティスタディ報告書—要旨—”, pp.34-55, Mar. 2007.
- [6] 小澤 雄一郎 他, “レクテナアレイシステム特性評価”, WPT2011-30(2012-03), pp.27-30, Mar. 2012
- [7] 小澤 雄一郎 他, “レクテナアレイシステム特性評価”, WPT2012-42(2013-03), pp.12-15, Mar. 2013