

レクテナアレイシステム特性評価

小澤 雄一郎[†] 藤原 暉雄[†] 藤原 栄一郎[†] 篠原 真毅[‡] 三谷 友彦[‡]

[†](株)IHI エアロスペース 〒370-2398 群馬県富岡市藤木 900 番地

[‡]京大大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: [†] yuichiro-ozawa@iac.ihico.jp, qfuji@js5.so-net.ne.jp, e-fujiwara@iac.ihico.jp

[‡] {shino, mitani}@rsh.kyoto-u.ac.jp

あらまし 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され、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 の実現には宇宙を周回する発電衛星システムの送電部の高効率化だけでなく、地上受電部の高効率化も重要な課題である。受電効率の向上のためには、受電したマイクロ波を整流するダイオードの低損失化だけでなく、レクテナを最適負荷の条件で動作させて集電し、電力として取り出す必要がある。昨年度我々は、64 素子のアンテナパネル、整流回路、レクテナ制御装置等の構成要素を個別に評価し、設計手法の確認と課題の抽出を行った。これを基に今年度は構成要素個々の高効率化およびレクテナシステムとしての高効率化を図り、より製品に近い形態で評価を行うこととした。具体的には、アンテナおよび整流回路を一体型とし、コネクタの削減、伝送線路長の最短化を行うことでレクテナ部分の高効率化を図った。また、レクテナ制御装置に定インピーダンス制御および定電圧制御を用いてレクテナに最適負荷を提供することで、システム全体の高効率化を図った。本稿では、今年度試作したレクテナアレイシステムの評価結果を報告する。

キーワード レクテナ、マイクロ波送電、宇宙太陽発電システム

Rectenna Array System Characterization

Yuichiro Ozawa[†] Teruo Fujiwara[†] Eiichiro Fujiwara[†] Naoki Shinohara[‡] and Tomohiko Mitani[‡]

[†] IHI AEROSPACE CO., LTD., 900 Fujiki, Tomioka, Gunma, 370-2398 Japan

[‡] Research Institute for Sustainable Humanosphere Kyoto University,

Gokasho Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: [†] yuichiro-ozawa@iac.ihico.jp, qfuji@js5.so-net.ne.jp, e-fujiwara@iac.ihico.jp

[‡] {shino, minatni}@rsh.kyoto-u.ac.jp

Abstract The SSPS has a transmitting section in space and a receiving section on the ground. The receiving section has a huge number of rectennas. In the section, a rectenna control unit is necessary to optimize an RF-to-dc conversion efficiency of rectenna array and to output stable DC power. We made a subsystem of rectenna array which has 64 antennas and a rectenna control unit. The paper reports the characterization result of rectenna array system.

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、宇宙を周回する送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装置が必要である[5]。そこで昨年度、経済産業省から委託を受けた(財)宇宙システム開発利用推進機構殿(旧(財)無人宇宙実験システム研究開発機構)と(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)殿が連携して実施している太陽光発電送受電技術の研究開発において、(財)宇宙システム開発利用推進機構殿ご指導の下開発しているマイクロ波電力伝送試験システム受電部の要素実験として、アンテナ、整流回路、レクテナ制御装置の個別評価とともに、高度マイクロ波エネルギー伝送実験装置(A-METLAB)を利用して全系接続してシステム評価を実施した。(財)宇宙システム開発利用推進機構殿のシステムでは受電モジュールを37枚設置する計画であるが、昨年度は受電モジュール1枚分のサブシステムを試作・評価した。これにより、設計手法の妥当性の確認および高効率化へ向けた課題の抽出を行った[6]。本稿では、昨年度の結果を受けて構成要素およびサブシステムとして高効率化を図った受電モジュール1枚分のレクテナアレイシステムを試作・評価した結果について報告する。

2. レクテナアレイシステム

図 2-1 および表 2-1 に本実験に供したレクテナアレイシステムの構成を示す。本システムは、受電モジュール1枚とレクテナ制御装置1台で構成する。

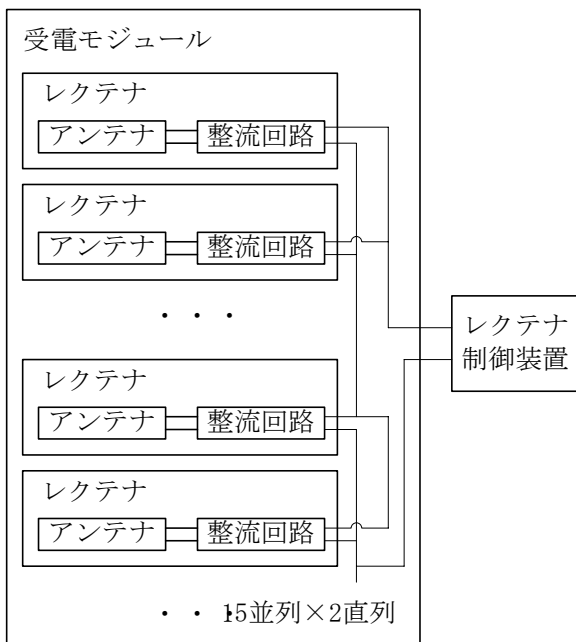


図 2-1 レクテナアレイシステム

2.1. 受電モジュール

受電モジュールはアンテナと整流回路で構成し、アンテナには円形パッチアンテナを用い、64素子を三角形配置した。アンテナ間隔は約 $0.7\sim 0.8\lambda$ 以上となると照射されたマイクロ波に対するアンテナの電力捕集効率が低下していくことが報告されている[7]が、今回は受電部開発計画等の観点から 0.9λ 間隔で配置することとした。また、アンテナ特性改善のため縦方向2素子ずつの出力を合成するペア素子化を行った。受電面背面には整流回路を構成し、耐電力と効率を考慮して整流回路内で2並列とした。これらアンテナと整流回路を表裏一体型とすることで接続コネクタの削除および伝送線路長の最短化を行った。整流回路出力は15並列×2直列としてレクテナ制御装置に接続し、整流回路2ペアはモニタ用として電力は取り出さなかった。表 2.1-1 に受電モジュールの仕様を、図 2.1-1 に受電モジュールの外観を示す。

表 2.1-1 受電モジュール仕様

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	15並列 ×2直列	
モニタ用整流回路	2素子ペア ×2	

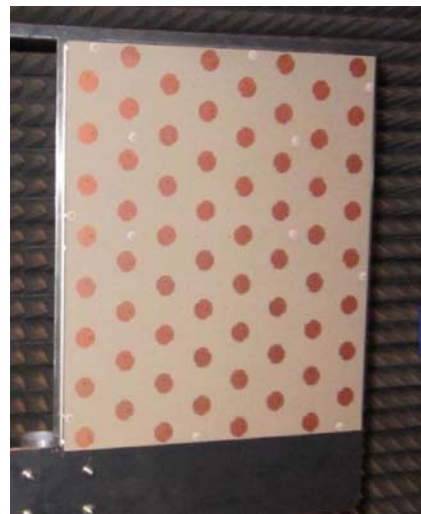


図 2.1-1 受電モジュール外観

2.2. レクテナ制御装置

レクテナの整流回路は負荷によって動作点が変わり、効率が変動する。整流回路に使用するダイオードによって最適負荷は異なることから、まず整流回路のRF-DC 変換効率特性を取得して高効率な動作点を把握し、そのときの整流回路出力電圧と出力電流からレクテナが高効率動作するときの負荷抵抗を求めた。次にレクテナ制御装置の入力インピーダンスがこの抵抗値となるようにレクテナ制御装置を設定した。また、整流回路の入力電力が大きくなると、ダイオードの逆耐電圧を超えて急激に効率が低下し、耐圧を超えた使用による整流回路故障につながる恐れもあることから、整流回路の出力電圧閾値を設け、入力電力が増加しても出力が閾値以上とならないように定電圧制御する機能を持たせた。このレクテナ制御装置を受電モジュール1枚に対して1台接続した。表 2.2-1 にレクテナ制御装置の仕様を、図 2.2-1 にレクテナ制御装置の外観を示す。また、レクテナ制御装置は受電モジュールとは分離した機器であることから個別に事前に効率特性を取得し、正常動作を確認した。レクテナ制御装置単体の電力伝達効率特性取得結果を図 2.2-2 に示す。

表 2.2-1 レクテナ制御装置の仕様

項目	仕様	備考
入力インピーダンス	24±1Ω	整流回路15並列×2直列の出力+/-間に接続
出力電圧	30~60V	
電力伝達効率	90%以上	



図 2.2-1 レクテナ制御装置外観図

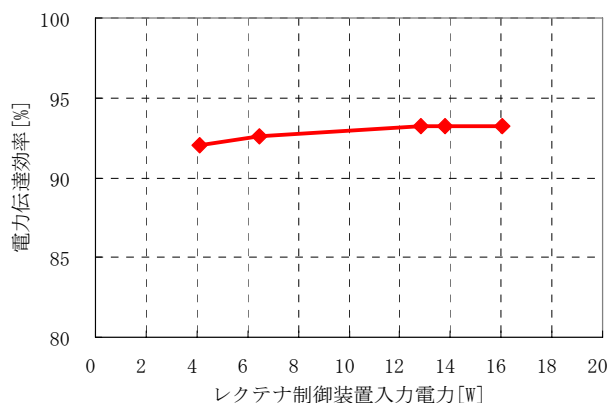


図 2.2-2 レクテナ制御装置電力伝達効率特性

3. レクテナアレイシステム評価実験

3.1. 受電面電力束密度分布の測定

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 14.5m 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図 3.1-1 に示すように設置し、5cm 間隔で格子状に電力束密度を測定した。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。実験中、送電器の ON/OFF を繰り返しても同条件で送電すれば、送電パターンモニタ用アンテナの出力変動は 1mW 以下であり、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 に測定した受電モジュールの受電面における電力束密度分布を示す。本実験では受電面における電力束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。

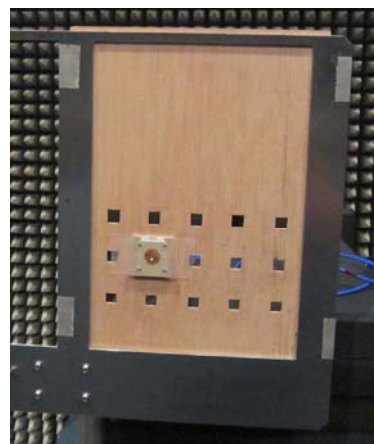
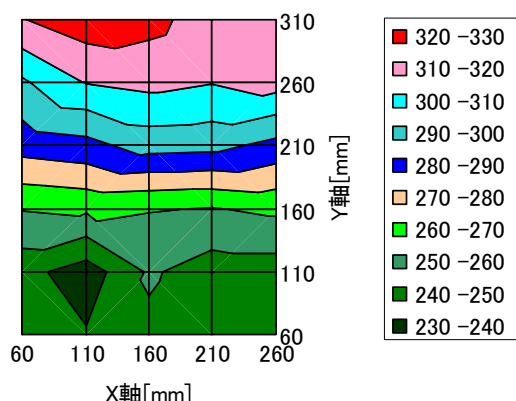


図 3.1-1 電力束密度測定状況



単位：W/m²

図 3.1-2 電力束密度分布

3.2. レクテナアレイシステム効率の測定

試験状況を図 3.2-1 に示す。

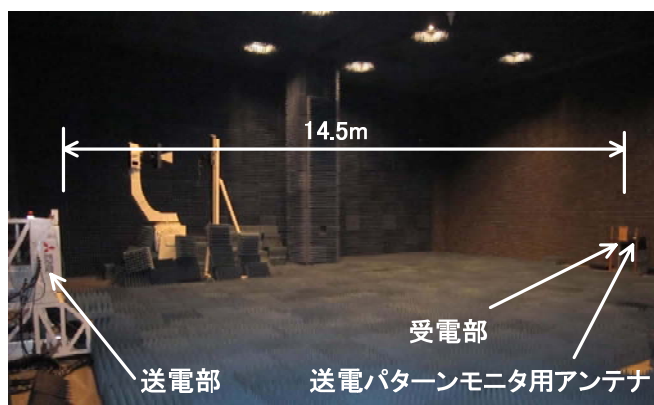


図 3.2-1 試験状況

まず受電面電力束密度分布と、アンテナ利得から算出される実効開口面積を用いて、整流回路への入力電力を求めた。各アンテナ中心における電力束密度は、測定した電力束密度分布を直線補間して求めた。また、今回の供試体はアンテナと整流回路が一体型であり、アンテナ利得を直接測定することができないため、昨年度同じ設計で製造したアンテナパネルの各アンテナの利得を用い、実効開口面積の算出を行った。その結果、入力電力合計は 21.6W であった。

次に受電モジュール出力電力およびレクテナ制御装置の出力電力を測定した結果、それぞれ 13.8W と 12.8W であった。これらを用いて、受電モジュール、レクテナ制御装置およびレクテナアレイシステム全体の効率を算出した。結果を表 3.2-1 に示す。表には参考に昨年度測定した効率改善前の結果も示す[6]。効率

改善の結果、システム全体として約 6%の改善効果を確認できた。

表 3.2-1 各部の効率

	測定結果	昨年度測定結果[6] (参考)
整流回路	63.8%	57.1%
レクテナ 制御装置	93.3%	93.5%
合計	59.5%	53.4%

4. まとめ

A-METLAB を利用して 5.8GHz のマイクロ波を受電アンテナに照射し、レクテナアレイシステムの評価を行った。今回はアンテナと整流回路を一体型とし、昨年度試作品からコネクタを排除、伝送線路長の短縮を行って改善を図るとともに、より製品に近い形態とした。結果、受電モジュールとレクテナ制御装置を組み合わせた RF-DC 変換効率として昨年度から約 6%向上し、59.5%が得られた。(財)宇宙システム開発利用推進機構殿のマイクロ波無線送受電システム受電部では 50%以上の効率を要求されており、今回の結果から要求を満足する目処を得ることができた。

(財)宇宙システム開発利用推進機構殿のシステムでは電力束密度のレンジがさらに広いが、レクテナの特性を把握してレクテナ制御装置を適切に動作させることで、高効率を維持できると考えている。次年度、さらに規模を拡張し、今回のレクテナアレイシステムを 9 枚正方形に配置して特性評価を行い、最終的に 37 枚の受電モジュールで受電部を構成する。

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ィ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] 大塚 昌孝 他, "有限レクテナアレーの素子間隔と受電効率", 信学論 (B-II), J73-B-II, 3, pp.133-139(1990年3月)